CUADERNOS DEL MUNDO ACTUAL

4



Las revoluciones científicas

Luis Enrique Otero Carvajal

Historia 16

295 ptas

historia 16

INFORMACION E HISTORIA, S. L.
PRESIDENTE: Isabel de Azcárate.
ADMINISTRADOR UNICO: Juan Tomás de Salas.
DIRECTOR: David Solar.
SUBDIRECTOR: Javier Villalba.
REDACCION: Isabel Valcárcel, José María Solé Mariño y Ana Bustelo.
CONFECCION: Guillermo Llorente.
FOTOGRAFIA: Juan Manuel Salabert.

Es una publicación del Grupo 16.
REDACCION Y ADMINISTRACION: Madrid. Hermanos García Noblejas, 41, 6.°. 28037 Madrid. Teléfonos 407 27 00-407 41 00.

Barcelona: Paseo de San Gervasio, 8, entresuelo. 08022 Barcelona. Teléfono 418 47 79.

SUSCRIPCIONES: Hermanos García Noblejas, 41. 28037 Madrid. Teléfonos 268 04 03 - 02.

PUBLICIDAD MADRID: Pilar Torija.
IMPRIME: Rivadeneyra, S. A.
DISTRIBUYE: INDISA. Rufino González, 34 bis. Teléfono: 586 31 00. 28034 Madrid.
ISBN: 84-7679-271-9
Depósito legal: M-25846-93

CUADERNOS DEL MUNDO ACTUAL

Coordinación:

Angel Bahamonde Magro, Julio Gil Pecharromán, Elena Hernández Sandoica y Rosario de la Torre del Río

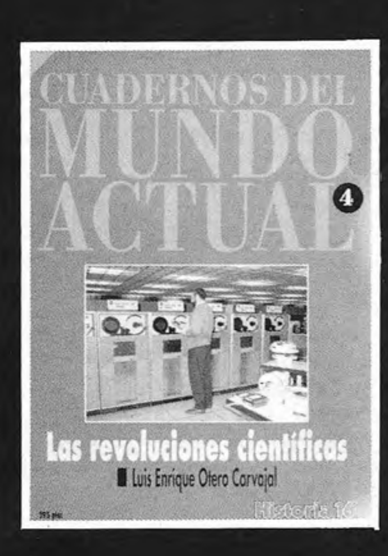
Universidad Complutense

1. La historia de hoy. • 2. Las frágiles fronteras de Europa. • 3. La sociedad española de los años 40. • 4. Las revoluciones científicas. • 5. Orígenes de la guerra fría. • 6. La España aislada. • 7. México: de Lázaro Cárdenas a hoy. • 8. La guerra de Corea. • 9. Las ciudades. • 10. La ONU. • 11. La España del exilio. • 12. El Apartheid. • 13. Keynes y las bases del pensamiento económico contemporáneo. • 14. El reparto del Asia otomana. • 15. Alemania 1949-1989. • 16. USA, la caza de brujas. • 17. Los padres de Europa. • 18. Africa: tribus y Estados, el mito de las naciones africanas. • 19. España: «Mr. Marshall». • 20. Indochina: de Dien Bien Fu a los jmeres rojos. • 21. Hollywood: el mundo del cine. • 22. La descolonización de Asia. • 23. Italia 1944-1992. • 24. Nasser. • 25. Bélgica. • 26. Bandung. • 27. Militares y política. • 28. El peronismo. • 29. Tito. • 30. El Japón de McArthur. • 31. El desorden monetario. • 32. La descolonización de Africa. • 33. De Gaulle. • 34. Canadá. • 35. Mujer y trabajo. • 36. Las guerras de Israel. • 37. Hungría 1956. • 38. Ghandi. • 39. El deporte de masas. • 40. La Cuba de Castro. • 41. El Ulster. • 42. La Aldea Global. Mass media, las nuevas comunicaciones. • 43. China, de Mao a la Revolución cultural. • 44. España: la emigración a Europa. • 45. El acomodo vaticano. • 46. Kennedy. • 47. El feminismo. • 48. El tratado de Roma. • 49. Argelia, de la independencia a la ilusión frustrada. • 50. Bad Godesberg. • 51. Nehru. • 52. Kruschev. • 53. España, la revolución del 600. • 54. El año 1968. • 55. USA, el síndrome del Vietnam. • 56. Grecia, Z. • 57. El fenómeno Beatles. • 58. Praga 1968. • 59. El fin del mito del Che. • 60. W. Brandt. • 61. Hindúes y musulmanes. • 62. Portugal 1975. • 63. El Chile de Allende. • 64. La violencia política en Europa. • 65. El desarrollo del subdesarrollo. • 66. Filipinas. • 67. España, la muerte de Franco. • 68. La URSS de Breznev. • 69. La crisis del petróleo. • 70. La Gran Bretaña de Margaret Thatcher. • 71. El Japón actual. • 72. La transición española. • 73. USA en la época Reagan. • 74. Olof Palme, la socialdemocracia sueca. • 75. Alternativos y verdes. • 76. América, la crisis del caudillismo. • 77. Los países de nueva industrialización. • 78. China, el postmaoísmo. • 79. La crisis de los países del Este, el desarrollo de Solidarnosc en Polonia. • 80. Perú, Sendero Luminoso. • 81. La Iglesia de Woytila. • 82. El Irán de Jomeini. • 83. La España del 23 F. • 84. Berlinguer, el eurocomunismo. • 85. Afganistán. • 86. España 1982-1993, el PSOE en el poder. • 87. Progresismo e integrismo. • 88. El peligro nuclear/la mancha de ozono. • 89. Gorbachov, la perestroika y la ruptura de la URSS. • 90. La sociedad postindustrial. • 91. La guerra del Golfo. • 92. Los cambios en la Europa del Este: 1989. • 93. La OTAN hoy. • 94. La unificación alemana. • 95. El SIDA. • 96. Yugoslavia. • 97. Hambre y revolución en el cuerno de Africa. • 98. Las últimas migraciones. • 99. Clinton. • 100. La España plural.

INDICE

Las revoluciones científicas

Luis Enrique Otero Carvajal



Ordenador central de una institución bancaria. La informática acompaña al desarrollo científico de la segunda mitad del siglo XX

Arriba, antena principal de la base del Instituto de Técnica Aeroespacial (INTA) en Maspalomas (Gran Canaria). Abajo, imagen del estrecho de Gibraltar a través de un monitor de seguimiento de la misma base

Las revoluciones científicas del siglo XX

Por Luis Enrique Otero Carvajal
Profesor de Historia Contemporánea.
Universidad Complutense de Madrid

Al parecer Einstein estaba doblemente equivocado cuando afirmó que «Dios no juega a los dados». Los estudios sobre la emisión de partículas desde agujeros negros permiten sospechar que Dios no solamente juega a los dados, sino que, a veces, los echa donde nadie puede verlos.
(Stephen W. Hawking)

Las palabras del célebre físico británico evidencian la magnitud de la revolución científica que ha recorrido el siglo XX. En efecto, la seguridad del hombre occidental en el progreso indefinido de la ciencia y, mediante la innovación tecnológica, de la humanidad a través del dominio de la Naturaleza ha sido cuestionada a raíz de la publicación en 1972 del primer *Informe* del Club de Roma sobre los límites del crecimiento. Esa confianza ilimitada en la ideología del Progreso comenzó a resquebrajarse con la aparición de las nuevas teorías que, desde el campo de la física, destruyeron los postulados básicos sobre los que se construyó la racionalidad moderna de la civilización occidental. Relatividad, mecánica cuántica, genética y biología molecular han dado lugar a una nueva representación del Universo y de la Naturaleza, alejada de los cánones de la visión derivada de la física newtoniana y sistematizada en la *Teoría del Conocimiento* del filósofo alemán Immanuel Kant.

El edificio de la Ilustración ha entrado en crisis a lo largo del siglo XX. Dos momentos son particularmente simbólicos de esta crisis. Los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, cuando el impacto moral de la hecatombe y la alteración radical del mapa político europeo confrontaron a los hombres ilustrados con el sentimiento de decadencia de la civilización occidental. El segundo momento lo estamos viviendo hoy en día. La caída del muro de Berlín ejemplifica la incertidumbre que atenaza a la sociedad del presente. El fin del milenio se ve atravesado por la sensación de ausencia de un horizonte diáfano respecto de los destinos del planeta y de la sociedad internacional. La crisis ecológica; la inexistencia de un orden internacional político y económico estable y vertebrado, tras la desaparición del orden mundial bipolar; el derrumbe del sistema económico, y el desmoronamiento de los grandes discursos ideológicos configurados a lo largo del siglo XIX, a partir de *mayo del 68,* nos sitúan ante una *crisis civilizatoria* de la que todavía no hemos sido capaces de diseñar las sendas que nos permitan superarla.

Sin embargo, una justa apreciación de las consecuencias derivadas de la revolución científica del siglo XX nos permite vislumbrar un horizonte en el que la incertidumbre derivada de la complejidad de los problemas actuales no sea interpretada como el callejón sin salida que parece recorrer a las instituciones y al espíritu de este fin de siglo.

Comprender las consecuencias profundas del significado de la revolución científica del siglo XX exige una somera recapitulación de los fundamentos de la racionalidad que ha entrado en crisis. Durante la segunda mitad del siglo XVIII la física newtoniana consiguió imponerse a lo largo y ancho del Viejo Continente, una vez solventadas las polémicas que enfrentaron a Newton con Descartes y Leibniz. La influencia del sistema newtoniano rebasó los límites estrictos de la Física, para convertirse en el fundamento de la Filosofía de la Ilustración.

La representación determinista

El gran éxito del sistema newtoniano a la hora de explicar los procesos físicos relacionados con el movimiento de los cuerpos y del sistema solar, sin obviar la importancia del método científico empleado en los *Principia*, explica el vigor de la Filosofía Natural propuesta por Newton, donde la Mecánica se constituye en la matriz en la que se funden los instrumentos necesarios para la explicación del *sistema del Mundo*. La representación mecanicista de la Naturaleza se convirtió así en la Filosofía Natural dominante en la cultura occidental desde mediados del siglo XVIII hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XIX, momento en el que la visión electromagnética de la Naturaleza disputó la primacía que hasta entonces había disfrutado el mecanicismo en la Física.

Fue a través del enorme influjo que sobre la cultura occidental ejerció la obra de Immanuel Kant como el sistema newtoniano adquirió un estatus de *verdad ontológica*, cimiento de todo el edificio del Saber clásico. En la *Crítica de la Razón Pura*, Kant trató de establecer los fundamentos y los límites de la razón humana, a través de la realización de una síntesis superadora de las dos grandes corrientes del pensamiento occidental de la segunda mitad del siglo XVIII: el racionalismo de la Ilustración y el empirismo inglés.

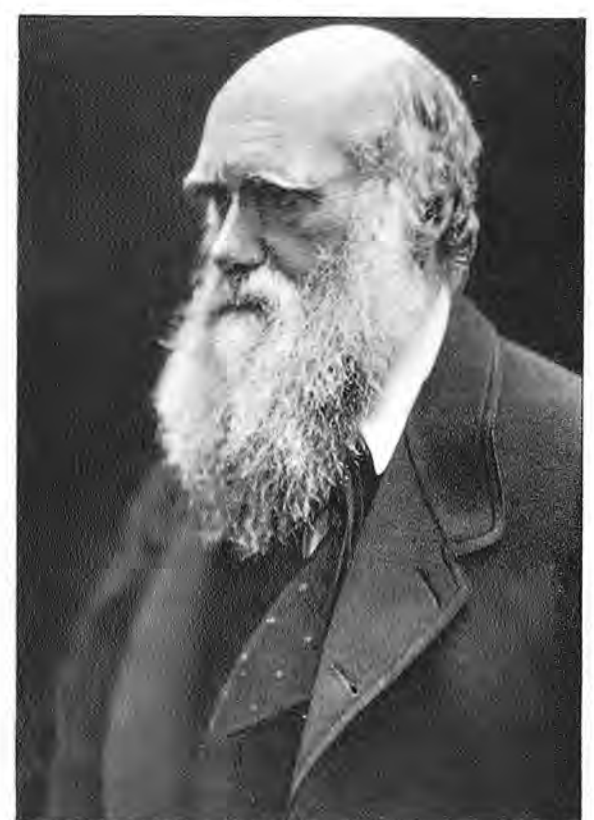
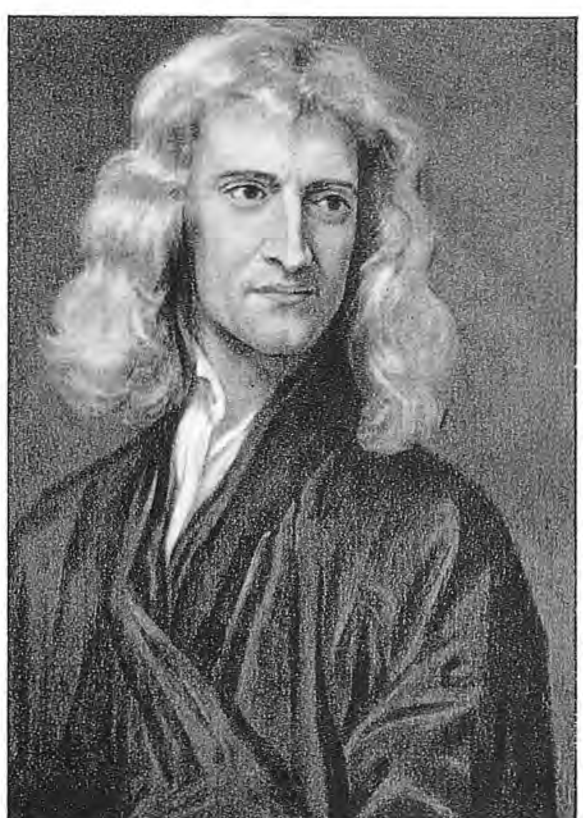
En la solución de las antinomias propuesta por Kant en la *Crítica de la Razón Pura* se condensa el marco conceptual de la nueva representación cosmológica que dominó la época clásica hasta la aparición de la Teoría General de la Relatividad en 1916. *El Mundo no tiene un principio en el tiempo ni límite extremo en el espacio.* Kant si-

El concepto de revolución científica

El concepto de revolución científica hace referencia a la aparición de teorías explicativas que introducen una nueva perspectiva a la hora de contemplar los fenómenos de la Naturaleza. Por tanto, para que una teoría pueda adquirir el estatus de revolución científica debe de tener un carácter lo suficientemente general, capaz de replantear sobre nuevas bases nuestra percepción de la realidad. Las innovaciones tecnológicas, por importantes y trascendentes que sean, no pueden, pues, ser consideradas bajo el concepto de revolución científica. Normalmente estas innovaciones tecnológicas representan la concreción práctica de los postulados teóricos de la llamada ciencia básica.

... las revoluciones científicas se consideran aquí como aquellos episodios de desarrollo no acumulativo en que un antiguo paradigma es reemplazado, completamente o en parte, por otro nuevo e incompatible... las revoluciones científicas se inician con un sentimiento creciente,... de que un paradigma existente ha dejado de funcionar adecuadamente en la exploración de un aspecto de la naturaleza... (Thomas S. Kuhn, La estructura de las revoluciones científicas, *1980.)*

... los más grandes descubrimientos científicos son programas de investigación que pueden evaluarse en términos de problemáticas progresivas y estancadas; las revoluciones científicas consisten en que un programa de investigación reemplaza a otro (superándolo de modo progresivo)... es primordialmente la heurística positiva de su programa, no las anomalías, la que determina la elección de sus problemas. Sólo cuando la fuerza rectora de la heurística positiva disminuya, se puede conceder más atención a las anomalías... la metodología de programas de investigación ofrece un panorama del juego de la ciencia muy diferente al falsacionismo metodológico. La mera jugada de salida no es una hipótesis falsable... sino un programa de investigación. La mera falsación *(en sentido popperiano) no debe implicar rechazo. (Imre Lakatos,* Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales, *1982.)*

Izquierda, Charles Darwin fotografiado por M. Cameron. Derecha, retrato de Isaac Newton por G. Kneller

túa la ley de la causalidad como ley fundamental de la Naturaleza, condición imprescindible de toda posibilidad de conocimiento: *Esta ley de la Naturaleza (...) es una ley del entendimiento en la que no está permitido, bajo ningún pretexto, apartarse o distraer ningún fenómeno, porque de otro modo se colocaría a este fenómeno fuera de toda experiencia posible...*

Lo que en Newton eran meros postulados en Kant adquirió el rango de absoluto. La extraordinaria influencia que tuvo la filosofía kantiana durante la primera mitad del siglo XIX contribuyó decisivamente a que físicos y matemáticos tomaran las leyes de la Física clásica por absolutamente necesarias. El concepto de Naturaleza defendido por Kant se constituyó así en la concepción dominante de la cultura occidental hasta la aparición de la Teoría de la Relatividad y la Mecánica Cuántica durante el primer tercio del presente siglo, instalándose en el centro de la *episteme* occidental hasta nuestros días.

A comienzos del siglo XIX el imperio de la Razón brillaba en todo su esplendor y, dentro del mismo, la representación determinista ocupaba una posición privilegiada. La aparición de la teoría evolucionista de Darwin, con la publicación de *El origen de las especies* en 1859, fue interpretada como la culminación de dicha representación, tal como afirmó el gran físico vienés Ludwig Boltzmann en su conferencia ante la Academia Imperial de la Ciencia, el 29 de mayo de 1886: *Si ustedes me preguntan por mi convicción más íntima, sobre si nuestra época se conocerá como el siglo del acero, o siglo de la electricidad o del vapor, les contestaré sin dudar que será llamado el siglo de la visión mecanicista de la naturaleza, el siglo de Darwin.*

Darwinismo y electromagnetismo

En *El origen de las especies* Darwin recurre para presentar su teoría al método hipotético-deductivo empleado por Newton. A partir de ahí, desarrolla las tesis malthusianas para explicar la lucha por la supervivencia de las especies, en función de su crecimiento geométrico frente al desarrollo aritmético de las fuentes alimentarias. Una vez establecido el principio de la lucha por la existencia, Darwin plantea el mecanismo

de la selección natural sobre la base de la adaptabilidad al medio, por la cual los organismos que incorporan mejoras heredables muestran mayores posibilidades para sobrevivir y reproducirse que los que no las incorporan o desarrollan variaciones heredables desfavorables. Paralelamente a la selección natural y complementaria a ésta se desarrolla la selección sexual por mediación del macho y/o de la hembra.

En *El origen de las especies* Darwin presenta de forma íntimamente asociada la evolución y la selección natural, eliminando cualquier referencia a la *generación espontánea*, de esta forma presentaba su teoría como un todo coherente, que respondía plenamente a las exigencias de una ley natural de carácter universal, acorde con los presupuestos epistemológicos de raíz newtoniana.

La construcción de una teoría sobre la naturaleza de la luz creó innumerables problemas de carácter teórico para la física del siglo XIX. A la altura de 1850 dos teorías contradictorias, la corpuscular y la ondulatoria, aparentemente incompatibles entre sí, pugnaban por explicar la naturaleza de la luz. Las dificultades se acrecentaban de manera notable a la hora de encontrar una manera satisfactoria de explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos, provocando una importante división entre los partidarios de una y otra teoría que terminó por desembocar en la construcción de una electrodinámica.

Con la Teoría Especial de la Relatividad, Albert Einstein modificó radicalmente la forma de ver la física, a través de una nueva formulación de los conceptos de espacio y tiempo

Con la llegada de James Clerk Maxwell la situación cambió radicalmente. Inspirándose en los trabajos de Michael Faraday, estableció la teoría unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos, para lo cual postuló la existencia del éter que, ocupando todo el espacio, se constituye en el medio en el que se desarrollan los fenómenos electromagnéticos. Además, Maxwell afirmaba que la luz era un fenómeno electromagnético más, por lo que la óptica debía ser considerada bajo la perspectiva de la electrodinámica y, por tanto, debía ser incluida en una teoría electromagnética que abarcaría los fenómenos ópticos.

A raíz de la aparición de la teoría electromagnética de Maxwell, se fue abriendo camino una nueva representación de la Naturaleza: la representación electromagnética, especialmente desde la aparición de los trabajos de Hertz en 1887-1888, en los que exponía sus experimentos, que demostraban la existencia de la radiación electromagnética. Los trabajos de H. A. Lorentz que culminaron con la aparición de la teoría electrodinámica de los cuerpos en movimiento, en 1892, no hicieron sino acrecentar el prestigio y el número de seguidores de la representación electromagnética de la Naturaleza en detrimento de la representación mecanicista.

Ahora bien, conforme la teoría electromagnética se iba imponiendo en los círculos científicos del último tercio del siglo XIX, surgieron voces que reclamaban una revisión crítica de los fundamentos de la Física clásica orientada a eliminar los *elementos metafísicos* que habían *contaminado* la Física teórica desviándola, a su juicio, de su verdadero carácter de ciencia empírica. Dos fueron las corrientes que sobresalieron en este período: el *sensacionismo* de Ernst Mach, cuyas posiciones se acercan bastante a una fenomenología de la ciencia, sobre todo en sus escritos histórico-críticos sobre Física, y el *energetismo,* cuyo máximo exponente fue el químico William Ostwald.

Einstein y la teoría de la relatividad

En cualquier caso, desde la crítica machiana no era posible destruir, ni Mach pensaba en ello, la *episteme* clásica. Tuvo que desarrollarse la revolución relativista y cuántica para que de la *crisis* se pasara a la *revolución de los fundamentos,* esto es, a la destrucción de los presupuestos epistemológicos básicos que habían configurado la *episteme* clásica, razón de ser de las formas del Pensar que han dominado la cultura occidental desde hace tres siglos.



Albert Einstein y otros emigrantes, *por B. Shahn. La Teoría de la Relatividad revolucionó la física clásica*

Einstein modificó radicalmente, con la Teoría Especial de la Relatividad, la forma de *ver* la física, al establecer que *no existía ninguna incompatibilidad entre el principio de relatividad y la ley de la propagación de la luz,* a través de una nueva formulación de los conceptos de Espacio y Tiempo. Para ello recurrió a una nueva definición del concepto de simultaneidad, según la cual *Cada cuerpo de referencia (sistema de coordenadas) tiene su tiempo especial; una localización temporal tiene sólo sentido cuando se indica el cuerpo de referencia al que remite.* Desaparece así el *tiempo absoluto* característico de la Mecánica clásica: deja de ser necesario para la Física y se convierte en un elemento superfluo que estorba ahora a la propia teoría física. La ruptura con la física clásica aparece aquí evidente. Otro tanto ocurre con el concepto de *espacio absoluto,* el concepto de *distancia espacial* entre dos puntos de un cuerpo rígido se encuentra en función del sistema de referencia y sólo en este sentido puede ser empleado en

Física. La reinterpretación de Einstein de las ecuaciones de transformación de Lorentz permitió establecer la transformación de las magnitudes espacio-temporales de un suceso al pasar de un sistema de referencia a otro. Einstein señalaba así su carácter de grupo, que no exigía la existencia de un sistema inercial privilegiado, diferente de los demás sistemas por su estado de reposo (*espacio absoluto)*.

Claro que esto que parecía tan sencillo a primera vista, suponía el fin de la vieja ilusión mecanicista, con lo que todo el edificio de la Física clásica, que tantos esfuerzos había costado levantar, se tambaleaba peligrosamente. Estas son las razones que explican la incapacidad de Lorentz para interpretar correctamente las ecuaciones de transformación que él mismo había descubierto, atrapado como estaba por la epistemología de la Física clásica; de manera similar, Poincaré no llegó a generalizar su principio de relatividad. Tuvo que ser Einstein quien cortase el nudo gordiano, haciendo desaparecer de la faz de la Física el espacio y el tiempo absolutos newtonianos.

La aparición de la Teoría Especial de la Relatividad provocó la ruptura de la estructura armónica y totalizadora de la cosmovisión procedente de la física clásica, según la cual las leyes de la Mecánica daban razón de la totalidad del Universo, constituyéndose en Leyes Naturales de carácter universal. La desaparición de un sistema de referencia privilegiado, constituido sobre la base de la existencia de un espacio y tiempo absolutos, eliminaba la posibilidad de establecer, bajo las premisas de la antigua física clásica, una teoría física que unificase, mediante el establecimiento de unas Leyes Generales, el funcionamiento de la Naturaleza, situación que se agravaría con el desarrollo de la Mecánica Cuántica durante el primer tercio del siglo XX, y que en la actualidad todavía no ha podido ser resuelta, a pesar de los esfuerzos teóricos desarrollados con el fin de dar con una teoría unificada, en la que se ensamblen los resultados alcanzados por la Relatividad y la teoría cuántica.

La Teoría Especial de la Relatividad analiza y resuelve los problemas físicos de los cuerpos en movimiento en sistemas de referencia inerciales, pero deja fuera de su campo de aplicación toda una serie de problemas físicos, como los del campo gravitatorio y la no equivalencia de todos los cuerpos de referencia de Galileo, de cara a la formulación de las leyes naturales. Einstein dedicó buena parte de sus esfuerzos intelectuales en los siguientes diez años a generalizar la relatividad especial. En la teoría especial había establecido la equivalencia de todos los sistemas inerciales para la formulación de las leyes de la naturaleza, pero pronto se planteó la pregunta de *si sólo se puede adjudicar un significado relativo al concepto de velocidad* y, por tanto, *¿debemos, con todo, seguir considerando la aceleración como un concepto absoluto?*

Einstein llegó pronto, en 1907, al convencimiento de que en el marco de la Teoría de la Relatividad Especial no había lugar para una teoría satisfactoria de la gra-

Albert Einstein



Nació el 14 de marzo en 1879 en Ulm, Alemania. En Zurich cursó estudios en la Escuela Politécnica federal, donde fue alumno de Hermann Minkovski, quien años más tarde contribuiría a la difusión y aceptación de la Relatividad Especial. Terminados sus estudios vio rechazadas sus pretensiones de entrar de profesor en la Universidad, viéndose obligado a trabajar en la oficina de patentes de Berna. Finalmente fue nombrado *privat-dozent* en Berna y en 1909 profesor de la Universidad de Zurich, ocupando la cátedra de física teórica de la Universidad de Praga en 1911, para regresar como catedrático poco después a Zurich. A finales de 1913 fue nombrado catedrático de la Universidad de Berlín, donde se encontraban Max Planck y W. Nernst. Desde el 1 de octubre de 1917 fue nombrado director del Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín. En 1921 recibió el premio Nobel de Física. En 1933, al subir Hitler al poder, Einstein emigró a los Estados Unidos por su origen judío y su militancia antinazi y progresista, fijando su residencia en el *Institute of Advanced Study* de Princeton, donde permaneció hasta su muerte el 18 de abril de 1955.

vitación. En el proceso de generalización de la Relatividad Especial se percató enseguida de la igualdad existente entre *masa inercial* y *masa pesante,* de donde se deducía que la aceleración gravitatoria es independiente de la naturaleza del cuerpo que cae. Esta igualdad ya había sido registrada por la física clásica, pero no había sido interpretada. El reconocimiento por parte de Einstein de que *la misma* cualidad del cuerpo se manifiesta como *inercia* o como *gravedad,* le condujo a establecer el *principio de equivalencia.*

De esta forma, Einstein encontró en 1907 el camino por el que podía ser generalizada la Relatividad Especial a los sistemas de referencia de movimiento uniformemente acelerado, es decir, el medio de aplicar las ecuaciones relativistas a un campo gravitatorio homogéneo, llegando a la conclusión de que debía producirse una aceleración en la frecuencia de los relojes situados en un campo gravitacional intenso respecto de la frecuencia de los relojes situados en campos gravitacionales débiles. En el artículo de 1907, Einstein llegó a la conclusión de que la acción de un campo gravitacional sobre la trayectoria de un rayo luminoso se manifiesta en su curvatura, algo que parecía entrar en abierta contradicción con el postulado de la Relatividad Especial, según el cual la velocidad de la luz en el vacío es constante.

El universo infinito y estático característico de la cosmología clásica debe ceder paso a una nueva representación: la del universo finito y dinámico de la Relatividad General

En la Teoría de la Relatividad General, completada por Einstein en 1916, se plantea una nueva ley general de la gravitación acorde con la física relativista, que elimina la acción instantánea a distancia de la teoría de la gravedad de Newton, dando cuenta del avance del perihelio de Mercurio —algo que no podía explicar la ley de gravitación newtoniana— y de la curvatura de la trayectoria de los rayos luminosos bajo la acción de intensos campos gravitatorios. En el campo gravitatorio relativista relojes sincronizados marchan a distinta velocidad según su posición en el mismo. El reloj situado en la periferia del campo gravitatorio marchará constantemente más despacio, respecto de un sistema de referencia no afectado por el campo gravitatorio, que el reloj situado en el centro del campo gravitatorio. De tal manera que resulta imposible dar una definición exacta del tiempo dentro de un campo gravitatorio. Otro tanto ocurre a la hora de efectuar una definición de las coordenadas espaciales; éstas variarán en función de cómo se sitúen dentro del campo gravitatorio. Tales resultados llevaron a la conclusión a Einstein de *que los teoremas de la geometría euclidea no pueden cumplirse exactamente sobre el disco rotatorio ni, en general, en un campo gravitacional... También el concepto de línea recta pierde con ello su significado.*

Einstein se vio obligado a abandonar la geometría euclidea como marco en el que se desenvuelve el espacio-tiempo bajo la acción de un campo gravitatorio, rompiendo radicalmente con la representación espacial de la física clásica. Einstein recurrió a la utilización de coordenadas gaussianas como el método adecuado a medidas —distancias— no euclideas, características del continuo espaciotemporal bajo el efecto de un campo gravitatorio.

La Teoría de la Relatividad General planteaba una nueva configuración del Universo, a partir de la nueva geometría del *continuo espaciotemporal* de carácter no euclideo. El Universo infinito y estático característico de la cosmología clásica se ve obligado a ceder el paso a una nueva representación: el Universo finito y dinámico de la Relatividad General.

La Mecánica cuántica

Si bien la Teoría de la Relatividad eliminó algunos de los presupuestos epistemológicos básicos de la física clásica, como el espacio y el tiempo absolutos, sobre los que se asentaba la representación moderna del Universo, no puso en cuestión la representación determinista de la Naturaleza, característica de la época Moderna. Dicha representación se asentaba en la validez univer-

sal del principio de causalidad clásico, cuyas premisas no quedaban afectadas por la revolución relativista. Lo que salvaguardaba la vigencia del criterio de realidad dominante en la física moderna, mediante el cual era posible aprehender la naturaleza de los procesos físicos sin interferencias del observador, postulado básico de la teoría del conocimiento desarrollada en la época Moderna.

Sin embargo, este pilar fundamental del *Saber* moderno pronto se vería afectado por una profunda crisis, como consecuencia del desarrollo de la Mecánica Cuántica. El inicio de esta fractura epistemológica se sitúa en la introducción del *cuanto de acción* por Max Planck en 1900, resultado de su investigación sobre el problema de la radiación del *cuerpo negro.*

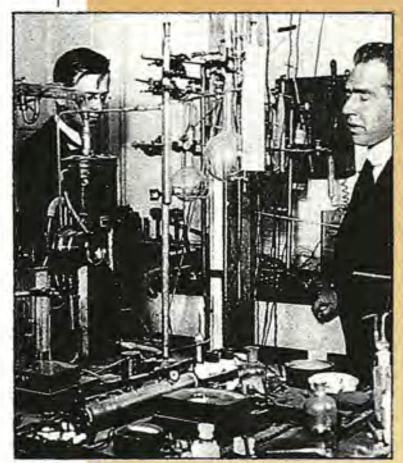
Con ello introdujo el *cuanto de energía* como una realidad física, al subdividir el continuo de energía en elementos de tamaño finito, asignándoles un valor constante y proporcional a su frecuencia. Un paso que rompía radicalmente con la física del siglo XIX, al introducir la discontinuidad en la emisión y absorción de energía, hecho del que no se percató el propio Planck cuando estableció su teoría de la radiación del cuerpo negro, y que tardaría en reconocer cerca de diez años por la repugnancia epistemológica que ello le producía.

La fórmula de Planck por la que se establecía una igualdad entre la energía concebida como discontinua y la energía considerada continua, en función del carácter ondulatorio de la frecuencia, resultaba completamente extraña para los físicos de la época. Sólo Einstein comprendería el problema en toda su magnitud, al postular en 1905 la existencia de partículas de luz —fotones—, y con ello establecer el carácter corpuscular y ondulatorio de la luz. Una posición que gozó de la animadversión del resto de los físicos, entre ellos el propio Planck, que atrapados por la teoría ondulatoria de la luz, dominante desde la segunda mitad del siglo XIX, no podían concebir un comportamiento a primera vista tan contrario a los postulados de la física. Tan sólo en 1922, con la introducción del efecto Compton y el desarrollo de la Mecánica Cuántica a partir de 1926-1927, la solución propuesta por Einstein se abrió camino.

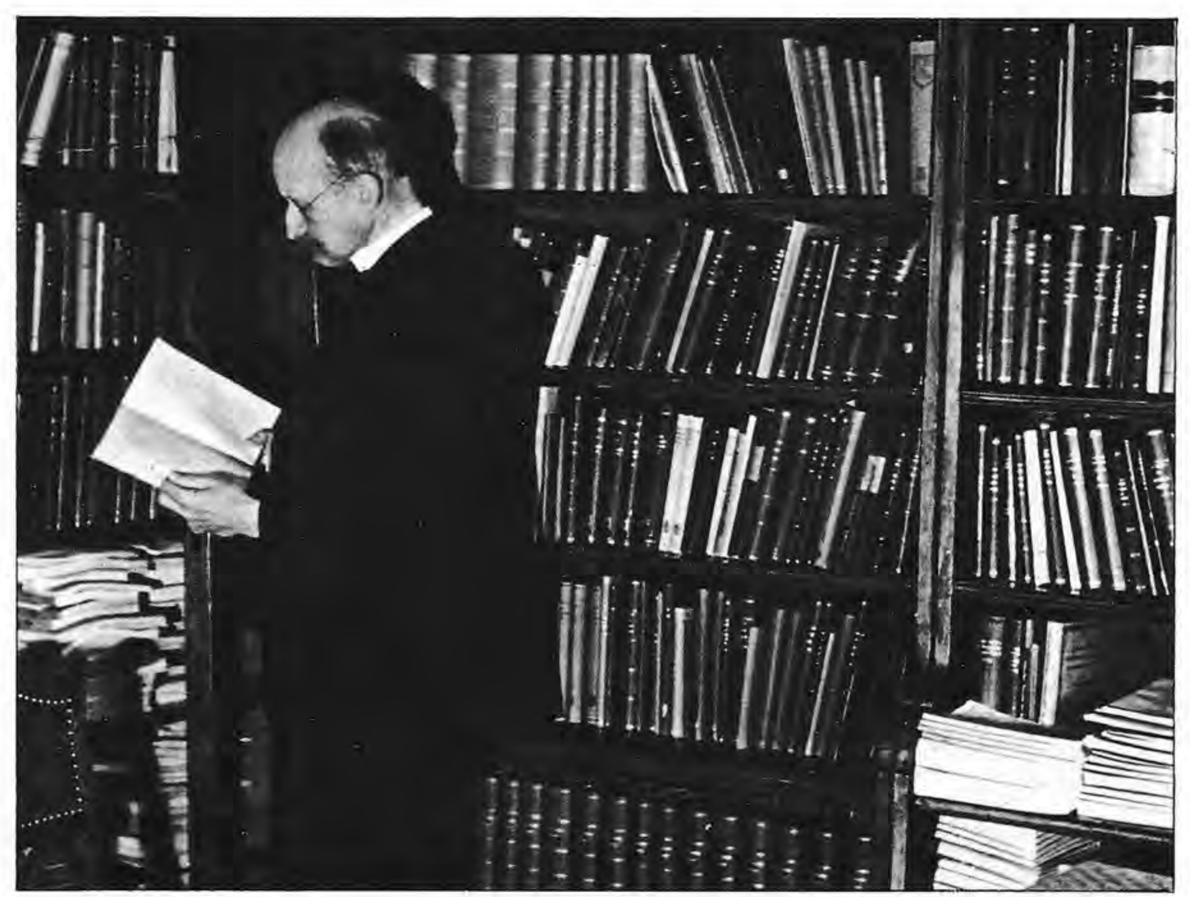
Fue Ehrenfest el primero en señalar que la teoría de Planck constituía una ruptura con la teoría clásica, al limitar la energía de cada modo de vibración a múltiplos enteros del elemento de energía establecido por la realidad física del cuanto de acción, señalando que la cuestión fundamental de la teoría de Planck radicaba en el tratamiento probabilístico del campo. A conclusiones similares, pero por caminos distintos, llegó Einstein en las mismas fechas, al defender que durante la absorción y la emisión la energía de un resonador cambia discontinuamente en un múltiplo entero.

La teoría de Einstein sobre los calores específicos planteaba la imposibilidad de reducir la discontinuidad a la interacción entre materia y radiación, ni siquiera era po-

Niels Bohr



Nació en Copenhague el 7 de octubre de 1885. Estudió física en su ciudad natal, en cuya Universidad se doctoró en 1911. Amplió su formacion en Cambridge bajo la tutela del gran físico británico J. J. Thomson y Rutherford. En 1916 fue nombrado profesor de Física de la Universidad de Copenhague, donde dirigió el Instituto de Física Teórica, que alcanzó fama mundial al ser uno de los centros impulsores de la teoría cuántica. En 1913 publicó una célebre memoria en donde aplicaba al modelo planetario del átomo propuesto por Rutherford la primera teoría cuántica. Nacía así la teoría cuántica del átomo. En 1922 recibió el premio Nobel de Física. Las consecuencias epistemológicas derivadas de la Mecánica Cuántica, respecto de su afirmación sobre el carácter probabilista de los fenómenos cuánticos, generaron una intensa polémica en los años veinte. Polémica que ha pasado a los anales de la historia de la Física por el debate sostenido entre Albert Einstein y Niels Bohr sobre el alcance y significado de la Mecánica Cuántica. Murió el 18 de noviembre de 1962 en Copenhague.



Las investigaciones de Max Planck, realizadas a partir de 1900, desarrollaron la Mecánica cuántica

sible reducirla a una teoría de los electrones mejorada. La teoría de Einstein era una teoría mecánico-estadística, independiente de consideraciones electromagnéticas, que exigía cuantizar la energía no sólo de los iones sino también de los átomos neutros. La aplicación de la mecánica clásica a cualquier proceso atómico era puesta en cuestión y con ella la totalidad de la teoría cinética. La discontinuidad aparecía así como un fenómeno de una gran generalidad y de profundas consecuencias físicas, que planteaba la reformulación sobre bases nuevas de la teoría cinética de la materia.

El siguiente gran paso no se produjo hasta 1913, cuando Niels Bohr aplicó la distribución cuántica de la energía para explicar el comportamiento de los electrones en el seno de la estructura atómica. Bohr resolvió así las dificultades del modelo atómico de Rutherford, al explicar por qué el átomo no emite radiación de forma continua y los electrones no se precipitan sobre el núcleo permaneciendo en órbitas estacionarias. Sin embargo, el modelo atómico de Bohr no estaba exento de dificultades teóricas, debidas a la introducción del cuanto de acción para explicar las transiciones energéticas del electrón. Ello implicaba que las transiciones entre los diferentes estados energéticos del átomo se producían mediante *saltos cuánticos*, algo que resultaba absolutamente incompatible con la teoría clásica que postulaba transiciones continuas de un estado de energía a otro. La dificultad se veía agravada por el recurso en la misma teoría a los principios de la mecánica y el electromagnetismo clásicos, para definir la carga y la masa del electrón y del núcleo. La utilización dentro del mismo modelo atómico de dos teorías, la clásica y la cuántica, incompatibles entre sí, generaba enormes problemas teóricos, que no fueron resueltos hasta la aparición de la Mecánica Cuántica en 1926-1927.

Los experimentos de Frank y Hertz de 1914 demostraron que la cuantización de los niveles de energía de los átomos constituía una propiedad de la materia muy general, incompatible con la teoría corpuscular clásica de la materia, pues para esta última la energía en un sistema de corpúsculos clásicos es una magnitud continua.

La publicación de un artículo de Heisen-

berg en 1925 representó un salto cualitativo en la resolución de los problemas que aquejaban a la teoría cuántica del átomo de Bohr, al proponer la necesidad de abandonar el concepto clásico de órbita electrónica e introducir un nuevo formalismo matemático, que sería desarrollado inmediatamente por Max Born y Pascual Jordan, consistente en la aplicación de la matemática de matrices. Nacía así la mecánica matricial, sobre la que se fundaría la Mecánica Cuántica. Paralelamente, Dirac llegó a resultados similares en Cambridge.

Por las mismas fechas, 1924-1926, se desarrolló la Mecánica Ondulatoria por De Broglie y Schrödinger. De Broglie generalizó la dualidad onda-corpúsculo de la luz, establecida por Einstein en 1905 para el caso del electrón, señalando que esta dualidad se encontraba íntimamente asociada a la existencia misma del cuanto de acción. Se trataba, en definitiva, de asociar al movimiento de todo corpúsculo la propagación de una onda, ligando las magnitudes características de la onda a las magnitudes dinámicas del corpúsculo, mediante relaciones en las que intervenía la constante de Planck.

Heisenberg rompe la pretensión de la física moderna de alcanzar la determinación absoluta hacia el pasado y hacia el futuro del universo

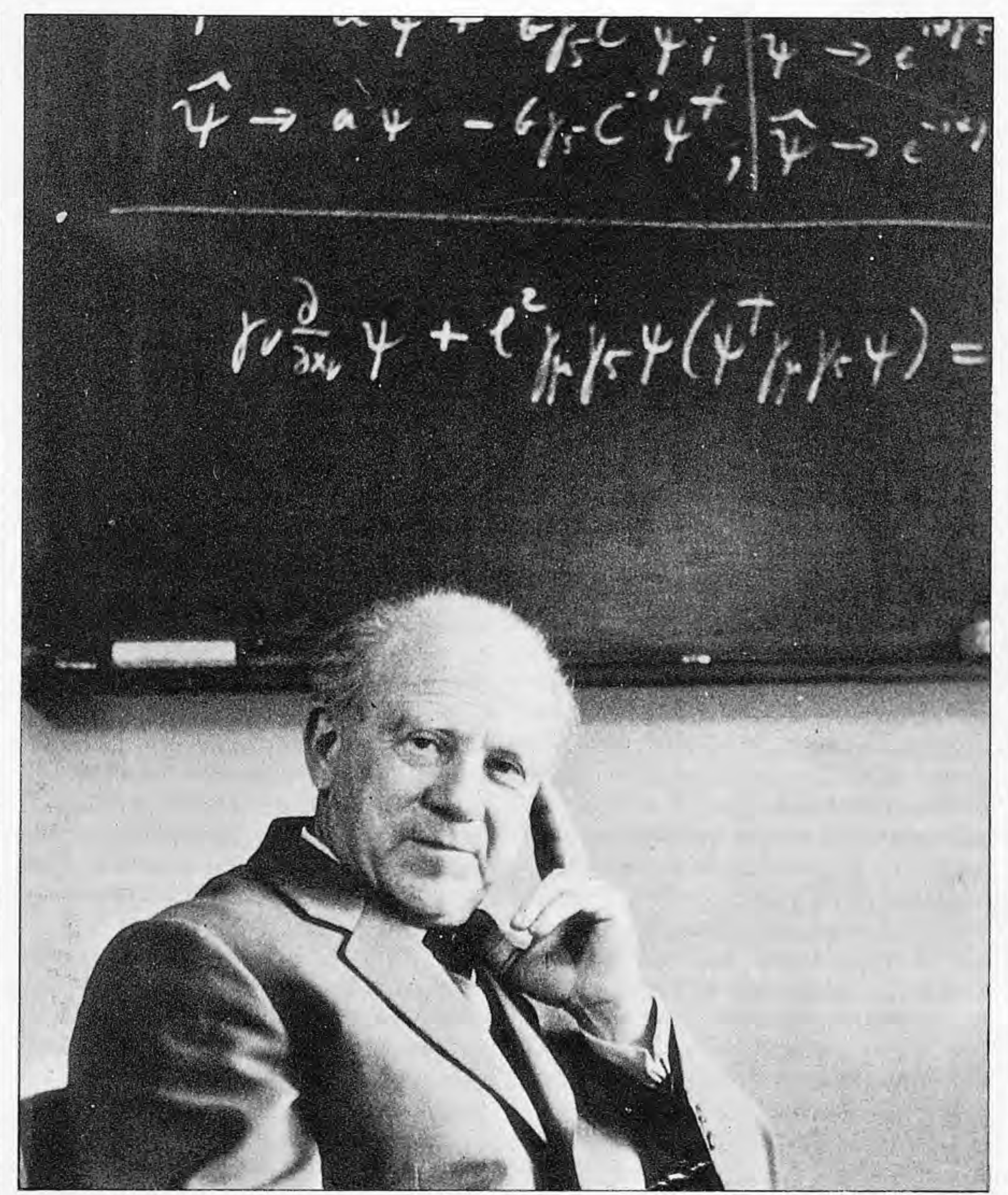
Esta nueva mecánica ondulatoria fue desarrollada por Schrödinger en los primeros meses de 1926. En ella señaló que los estados estacionarios de los sistemas atómicos podían representarse por las soluciones propias de una ecuación de ondas, cuyo formalismo matemático encontraba fundamento en la solución de Hamilton respecto de la analogía formal existente entre los sistemas mecánicos y ópticos.

La situación no podía dejar de ser más confusa. Por una parte, el desarrollo de la nueva mecánica matricial ofrecía una teoría que resolvía matemáticamente los problemas que habían aquejado a la primera teoría cuántica, sobre la base de la consideración corpuscular del electrón, obviando su posible comportamiento ondulatorio. Por otra parte, la mecánica ondulatoria de Schrödinger se basaba en el comportamiento ondulatorio del electrón y obviaba el posible carácter corpuscular del electrón. Dos teorías que en principio parecían radicalmente contradictorias, sin embargo, alcanzaban resultados similares.

La situación se complicó aún más por la interpretación clásica que Schrödinger hizo de la ecuación de ondas, que perseguía eliminar los saltos cuánticos y la discontinuidad de los procesos atómicos, sobre la base de interpretar la función de ondas de su ecuación desde la perspectiva de la teoría clásica de la radiación electromagnética. En otras palabras, interpretó la teoría cuántica como una simple teoría clásica de ondas, en la que era negada categóricamente la existencia de niveles discretos de energía. La interpretación clásica de Schrödinger encontró una gran audiencia entre los físicos, pues eliminaba el contrasentido de los *saltos cuánticos* que amenazaba a todo el edificio de la física clásica. Dicha interpretación fue contestada por Niels Bohr, Werner Heisenberg y Max Born.

Fue Max Born quien resolvió la polémica y clarificó la situación, mediante su interpretación estadística de la ecuación de ondas de Schrödinger, al poner de manifiesto el carácter equivalente de la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria; debido a que la ecuación de ondas, por su carácter complejo, exigía una interpretación probabilística de la localización en el espacio de la partícula asociada. Born sostenía que en los procesos individuales no es posible determinar con exactitud el estado de la partícula, sino que sólo puede establecerse la probabilidad del estado de la partícula, como consecuencia de la existencia del cuanto de acción. De esta manera, la función de la ecuación de ondas debía ser interpretada como la probabilidad de encontrar al electrón en el espacio de configuración determinado por el cuadrado de la función de ondas, no siendo posible una determinación exacta de la posición del electrón. En otras palabras, Born demostró que la ecuación de ondas de Schrödinger sólo podía ser interpretada de una forma probabilística.

La interpretación probabilista de la mecánica cuántica realizada por Max Born, completada por la teoría de la transformación de Dirac y Jordan, constituyó un avance sustancial en la comprensión del signifi-



Werner Heisenberg postuló en 1927 las* relaciones de incertidumbre *como un principio físico fundamental

cado de la nueva mecánica cuántica, al establecer el carácter físico de la probabilidad cuántica, hecho que constituía una profunda fractura con los fundamentos epistemológicos de la física clásica, por cuanto establece que tanto la localización espacial del electrón como los estados estacionarios del átomo sólo pueden ser determinados probabilísticamente.

La aparición en 1927 del artículo de Heisenberg en el que introducía las *relaciones de incertidumbre* como un principio físico fundamental, al postular que no es posible conocer simultáneamente la posición y el impulso de una partícula, no hizo sino profundizar dicha fractura epistemológica, al romper radicalmente con la antigua pretensión de la Física Moderna de alcanzar, mediante el conocimiento completo de todos los fenómenos físicos del Universo en un ins-

tante dado, la determinación absoluta hacia el pasado y hacia el futuro del Universo, en función de la validez universal del principio de causalidad estricto, origen y fundamento de la representación determinista de la Modernidad. El artículo de Heisenberg apuntaba directamente al corazón de la vieja gran aspiración de la Física Moderna, al sostener la imposibilidad física del conocer simultáneamente con exactitud determinista la posición y el impulso de cualquier clase de partícula elemental. Según las relaciones de incertidumbre, el producto de las incertidumbres de la localización y de la cantidad de movimiento no puede ser más pequeño que el cuanto de acción de Planck, constituyendo éste un límite físico infranqueable.

Para poder apreciar el papel que desempeñó el principio de incertidumbre en la renuncia del principio de causalidad estricto, conviene recordar que en la mecánica clásica son justamente los valores iniciales y los ritmos iniciales de cambio de todas las variables mecánicas —que definen el estado de un sistema dado— los que determinan los movimientos futuros del sistema en cuestión. Sin embargo, de acuerdo con el principio de incertidumbre, existe una limitación fundamental, derivada de las mismas leyes de la naturaleza en el nivel cuántico, consecuencia de la existencia del cuanto de acción, que hace imposible la predicción determinista del comportamiento de los procesos físicos cuánticos, debido a su naturaleza esencialmente probabilística.

La formulación de la ecuación de Einstein, por la que la energía y la materia están directamente ligadas ($E=mc^2$), fue el fundamento teórico de la física nuclear

La ruptura epistemológica con la física clásica se torna evidente si consideramos que ésta asocia a los sistemas físicos, cuya evolución desea describir, un cierto número de magnitudes o de variables dinámicas. Estas variables dinámicas poseen todas ellas, en cada instante, un valor determinado, a través de los cuales queda definido el estado dinámico del sistema en ese instante. Por otra parte, se admite, en la física clásica, que la evolución del sistema físico a lo largo del tiempo está totalmente determinada cuando se conoce su estado en un momento inicial dado.

El *principio de incertidumbre* se constituye en un principio físico fundamental que rige para el conjunto de los fenómenos, y que no es posible soslayar en los niveles de magnitudes en los que el cuanto de acción no es despreciable. El principio de incertidumbre se extiende, como principio físico fundamental, al conjunto de las relaciones físicas de las magnitudes cuánticas, y no sólo a las relaciones de incertidumbre de posición e impulso. Las consecuencias epistemológicas de las relaciones de incertidumbre alcanzaban de lleno al centro mismo de lo que había sido la Física desde los tiempos de Newton; es decir, cuestionan la capacidad de la Física para establecer leyes de la Naturaleza que determinen con absoluta precisión su funcionamiento como si de un mecanismo de relojería se tratara.

Ello provocó una fuerte polémica entre los defensores y detractores de la mecánica cuántica, centrada en el alcance de las consecuencias epistemológicas y la interpretación que debía realizarse de la nueva teoría cuántica. Polémica cuyos rescoldos todavía no se han apagado en la actualidad, si consideramos las posturas mantenidas por el neodeterminista Bunge o el realista clásico Popper, por citar sólo dos casos. La fractura era tan radical que tanto Planck como Einstein se negaron hasta su muerte a aceptar los resultados de la mecánica cuántica, al considerar que significaba el fin de la física como teoría comprensiva de la Naturaleza. En el caso de Einstein, éste mantuvo una prolongada y famosa polémica con Niels Bohr iniciada en la V Conferencia Solvay, celebrada en Bruselas en octubre de 1927, y continuada hasta su fallecimiento en 1955. De dicha polémica Einstein salió derrotado pero no vencido, y aunque terminó aceptando a su pesar la validez del formalismo de la mecánica cuántica, no cejó en su intento de demostrar que la interpretación de dicho formalismo no era correcta.

Einstein, en una carta dirigida a Max Born en 1926, explicitaba su repugnancia a las consecuencias de la mecánica cuántica: *la mecánica cuántica es algo muy serio.*

Pero una voz interior me dice que de todos modos no es ese el camino. La teoría dice mucho, pero en realidad no nos acerca gran cosa al secreto del Viejo. En todo caso estoy convencido de que Él no juega a los dados. En 1957 De Broglie expresaba con claridad la validez de las consecuencias que Einstein rechazaba: *Mientras que en la física clásica era posible describir el curso de los sucesos naturales como una evolución conforme a la causalidad, dentro del marco del espacio y del tiempo (o espacio-tiempo relativista), presentando así modelos claros y precisos a la imaginación del físico, en cambio, en la actualidad la física cuántica impide cualquier representación de este tipo y, en rigor, la hace completamente imposible. Sólo permite teorías basadas en fórmulas puramente abstractas, desvirtuando la idea de una evolución causal de los fenómenos atómicos y corpusculares; únicamente suministra leyes de probabilidad considerando que estas leyes de probabilidad son de carácter primario y constituyen la esencia de la realidad cognoscible; y no permiten que sean explicadas como consecuencia de una evolución causal que se produjera a un nivel aún más profundo del mundo físico.*

La relatividad general y la mecánica cuántica son las dos grandes teorías sobre las que se basa la actual representación del Universo. Un universo dinámico y en expansión, que encuentra sus orígenes en el big-bang. Las observaciones astronómicas realizadas hasta la fecha han confirmado las previsiones teóricas de la cosmología contemporánea. Pero, además, la relatividad general y la mecánica cuántica no sólo ha destruido los fundamentos sobre los cuales descansaban los pilares básicos de la racionalidad occidental en la época moderna y nos permiten explicar la estructura del Universo, sino que también se han constituido en el núcleo central de los desarrollos de la ciencia del siglo XX. La formulación de la ecuación de Einstein por la que la energía y la materia están directamente ligadas ($E=mc^2$) fue el fundamento teórico para el desarrollo de la física nuclear, que ha dado lugar a las bombas atómicas, pero también a las centrales nucleares o la medicina nuclear.

Del átomo a la estructura de la vida

La mecánica cuántica está en la base de una nueva rama de la física que ha tenido desarrollos espectaculares en la segunda mitad del siglo: la *física del estado sólido.* Wolfgang Pauli fue el primero en desarrollar la nueva estadística de los metales, a partir de la introducción del espín del electrón, Sommerfeld impulsó estos trabajos desde la dirección del Instituto de Física de Munich entre 1927 y 1928. Mediante la utilización de la ecuación cinética de Boltzmann obtuvo las expresiones de las conductividades eléctrica y térmica, además de estudiar la emisión termoiónica y los efectos galvanomagnéticos y termomagnéticos. El avance de estos estudios desembocó, en 1947, en el descubrimiento del transistor, por parte de Walter Brattain, John Bardeen y William Shockey en los laboratorios Bell de los Estados Unidos. La teoría de Sommerfeld presentaba fuertes dificultades dado su carácter semiclásico, al igual que sucediera con el modelo atómico de Bohr de 1913, debido a la combinación de Fermi y Dirac. La solución vino en la misma dirección que desembocaría en 1926-1927 en la mecánica cuántica: el abandono de la física clásica. Fue Felix Bloch, alumno de doctorado de Werner Heisenberg, quien dio el paso fundamental que llevaría a la *teoría de bandas,* base sobre la que se edificó la física del estado sólido, al establecer que no todos los niveles energéticos del electrón permitían la conductibilidad.

Sin las técnicas de difracción de rayos X difícilmente se habrían podido conocer la estructura y funcionamiento de los procesos biológicos a nivel molecular

De esta forma, entre 1928 y 1933, se comprendió el porqué de los metales y los aislantes y la naturaleza de los semiconductores. Hechos que tenían una enorme trascendencia para el desarrollo de la electrónica, las telecomunicaciones, la física de los

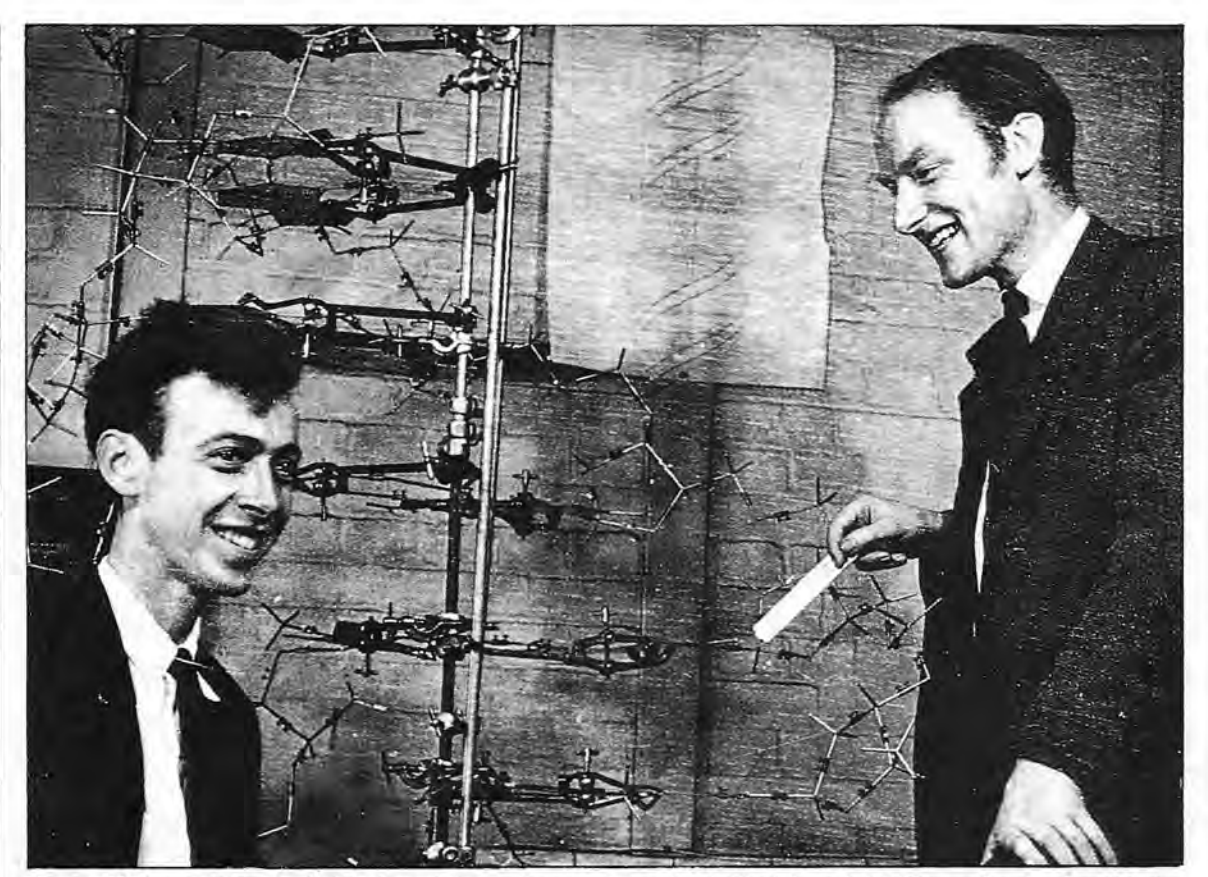
metales y de los sólidos en general, con aplicaciones en los sectores metalúrgicos y fotográfico. Estados Unidos fue el país donde estos nuevos desarrollos teóricos encontraron un caldo de cultivo propicio para la investigación aplicada, merced a la colaboración de la industria y la Universidad: así ocurrió con John Slater desde el MIT con la colaboración de General Electric, o los cursos sobre física de los metales desarrollados por la Universidad de Pittsburgh y financiados por la Westinghouse. Paralelamente, se desarrolló la química cuántica, a partir de la publicación del artículo de Walter y Fritz London sobre la molécula de hidrógeno en 1927, que junto con los trabajos de Friedrich Hund, Robert Mulliken y John Lennard-Jones, sobre el modelo orbital-molecular del enlace químico, desembocaron en los trabajos de Linus Pauling sobre la naturaleza del enlace químico.

La genética permite detectar la existencia de genes desencadenantes de enfermedades y establecer técnicas analíticas para su prevención

La biología molecular es, asimismo, deudora de la física cuántica. Sin las técnicas de difracción de rayos X difícilmente se habría podido avanzar en el conocimiento de la estructura y funcionamiento de los procesos biológicos a nivel molecular. En esta labor desempeñaron un papel pionero los británicos William Henry y William Lawrence Bragg. William Henry Bragg desentrañó en 1921 la estructura del naftaleno y del antraceno, mientras sus colaboradores Müller y Shearer investigaron la de los hidrocarburos. Su hijo William Lawrence Bragg se ocupó por esos años de la estructura de los minerales, sobre todo de los feldespatos. En 1938 Lawrence Bragg se hizo cargo de la dirección del laboratorio Cavendish en Cambridge, a raíz de la muerte de Rutherford en 1937, donde permaneció hasta 1953, convirtiendo el laboratorio de cristalografía en líder mundial de la física de materiales, con la ayuda financiera del Medical Research Centre. Las investigaciones impulsadas por Lawrence Bragg desembocaron en el descubrimiento de la estructura de la hemoglobina por Max Perutz entre 1953 y 1957. La aplicación de la difracción de rayos X permitió otro de los grandes logros científicos del siglo XX, el descubrimiento de la estructura del ácido desoxirribonucleico (DNA), la famosa doble hélice, por James Watson y Francis Crick en 1953 en el Cavendish. Dos acontecimientos que marcan la consolidación de la biología molecular y su trascendencia para el avance de las ciencias biomédicas.

En el descubrimiento de la estructura del DNA desempeñó un papel de primer orden la química cuántica y uno de sus máximos representantes Linus Pauling, su concepción de la biología molecular derivaba de su formación como físico y su conocimiento de la teoría cuántica, según sus palabras ésta era *una parte de la química estructural, un campo que estaba comenzando a desarrollarse cuando empecé a trabajar en la determinación de estructuras de cristales mediante difracción de rayos X en el California Institute of Technology en 1922.* Pauling estaba convencido de que el futuro de la biología molecular pasaba por el conocimiento de la química de las macromoléculas, y que la clave de los procesos biológicos se encontraba en el comportamiento de los enlaces químicos de los átomos, especialmente del carbono. Esta convicción y la financiación de la Fundación Rockefeller concedida para investigaciones en el campo biomolecular desembocaron, en 1950, en el descubrimiento por Pauling y Robert Corey de la estructura en forma de hélice de las cadenas de polipéptidos, base sobre la que se sustentaría el descubrimiento de la estructura de doble hélice del DNA.

Así pues, la mecánica cuántica ha permitido, mediante el conocimiento del comportamiento de los fenómenos atómicos y de la estructura de la materia, el desarrollo de nuevas disciplinas como la física de altas energías o la electrodinámica cuántica, o ha posibilitado importantes avances en múltiples disciplinas, desde la biología molecular y la bioquímica a la informática o la superconductividad. Avances que están en la base de algunas innovaciones tecnológicas más trascendentes de los últimos treinta años y que nos sitúan a las puertas de desarrollos aún más espectaculares. La mecánica cuántica ha permitido, en el ámbito de la biología molecular, avances sustanciales que han desembocado en el conocimiento de la estructura del DNA y en el comporta-



James Watson y Francis Crick descubrieron la estructura de doble hélice del DNA en Cambridge (1953)

miento de los procesos bioquímicos básicos en el interior de la célula, contribuyendo de manera decisiva a la nueva teoría evolutiva que se ha levantado sobre la base de los resultados de la genética mendeliana y de la reinterpretación de la teoría darwinista.

El eclipse del darwinismo

Si a la altura de 1875 las tesis darwinistas se habían abierto camino en la comunidad científica y extendido su influencia a los sectores ilustrados de la sociedad europea, vencidas las iniciales resistencias de los *antidireccionalistas,* a finales de siglo el darwinismo vio erosionado su prestigio entre los naturalistas, fruto del resurgimiento del *neolamarckismo* y de la *ortogénesis.*

En el cambio de siglo los oponentes a la selección natural estaban convencidos de la decadencia de la teoría darwinista como modelo explicativo del origen y evolución de los organismos vivos. Los principales argumentos en contra del darwinismo pueden resumirse en la discontinuidad del registro fósil, los cálculos de Kelvin, el problema de la existencia de estructuras no adaptativas, la aparente regularidad artificial de algunos mecanismos evolucionistas, las dificultades para explicar la variación y el argumento de la *herencia mezclada.* La selección natural se basaba en la afirmación de que los caracteres aparecían y se consolidaban en función de su valor en la lucha por la supervivencia. La existencia de *caracteres no adaptativos* constituía algo difícilmente explicable sobre la base del primado que la teoría darwinista atribuía a la adaptabilidad al medio en el proceso evolutivo. La excesiva regularidad artificial que parecía desprenderse de la selección natural fue otra objeción de peso debido a las dificultades para explicar la existencia de regularidades entre especies actuales muy alejadas entre sí o en el tiempo. Este problema fue uno de los argumentos clave para el desarrollo de la *ortogénesis.* Las variaciones entre individuos de la misma especie tampoco podían ser explicadas satisfactoriamente por el darwinismo, puesto que la combinación de selección natural y adaptabilidad al medio parecían apuntar a la uniformidad de los individuos de cada especie. El argumento de la *herencia mezclada* se constituyó en un

ejemplo totalmente negativo para la selección natural, las mutaciones individuales no tenían ninguna significación en la evolución de la especie, en una época en la que la teoría mendeliana era todavía desconocida.

Finalmente, dos elementos ajenos a la propia teoría darwinista también contribuyeron a su declive. En primer lugar, la repugnancia que algunos naturalistas mantenían todavía respecto del carácter materialista que parecía apuntar la selección natural, el *neolamarckismo* y la *ortogénesis* ofrecían un espacio para la reintroducción de interpretaciones teístas, eliminando las desagradables consecuencias de una acción ciega de la Naturaleza. Por otra parte, otros naturalistas se mostraban profundamente en desacuerdo con los postulados del *darwinismo social*, que era derivado directamente de la selección natural, por el que se justificaba la superioridad racial, en un momento en el que las teorías raciales comenzaban a estructurarse dentro del núcleo matriz de determinados movimientos sociopolíticos o por los excesos en los que habían caído algunos partidarios de la antropología criminal y de las corrientes higienistas, a la hora de explicar los problemas de marginación social, sobre la base de la degeneración hereditaria.

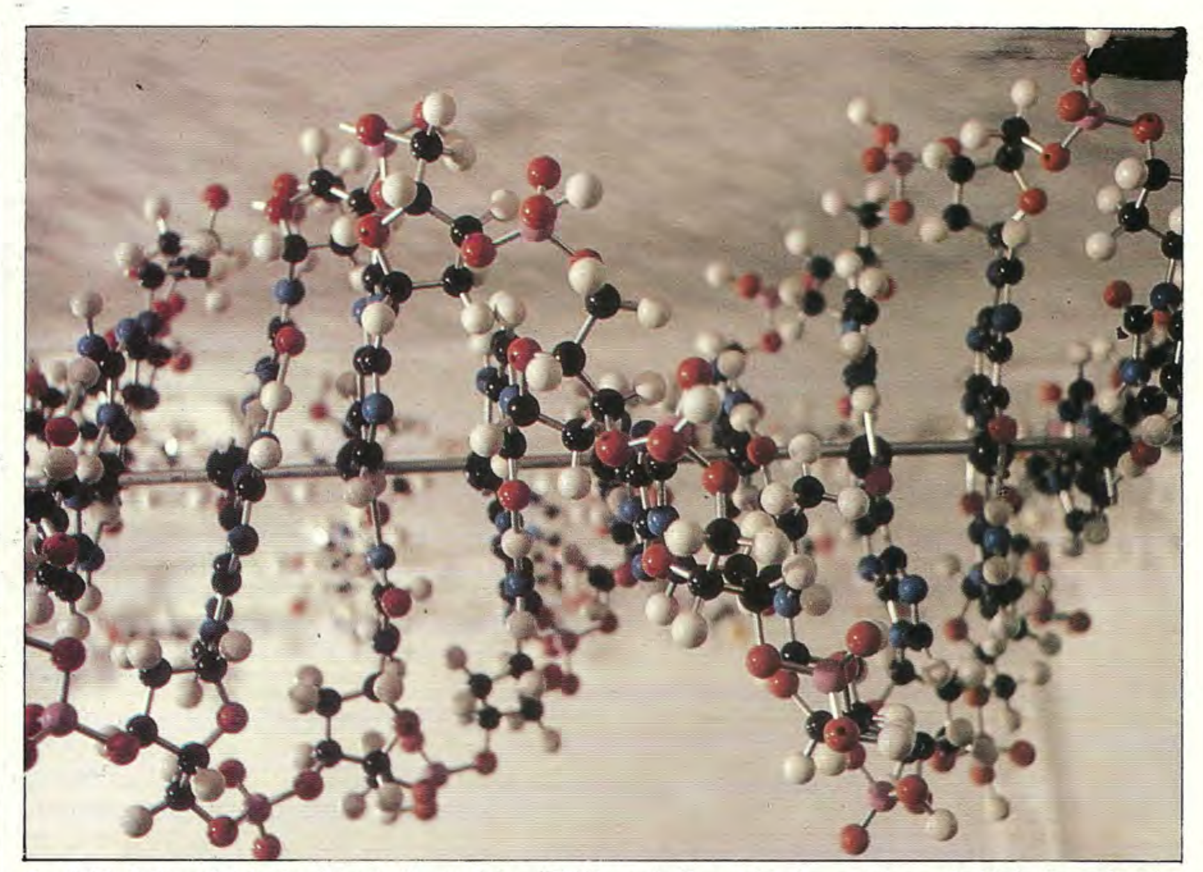
El término *neolamarckismo* había surgido de la mano del norteamericano Alpheus Packard en 1885. Fue en Norteamérica donde esta corriente encontró su mayor difusión, sobre todo entre los paleontólogos. Las razones del resurgimiento de las tesis lamarckianas pueden explicarse en dos grandes direcciones. De un lado, la mayor adecuación explicativa de las tendencias lineales observadas en el registro fósil. De otro, su capacidad para integrar la herencia de los caracteres adquiridos. La creencia de que el crecimiento individual (*ortogenia*) recapitula la historia evolucionista de la especie (*filogenia*) concordaba con la visión neolamarckiana de la variación y la herencia tal como fue enunciada por la *ley biogenética* de Haeckel y la *ley de la aceleración del crecimiento* de la escuela norteamericana. Para los neolamarckianos los caracteres adquiridos como consecuencia del desarrollo del individuo y de su capacidad de adaptabilidad al medio eran posibles por su incorporación en la edad adulta al *plasma germinal*, especie de *célula madre* en la que se depositaban los caracteres hereditarios. El neolamarckismo encontraba, por tanto, posibles puntos de contacto con la ortogénesis en su combate contra el darwinismo.

La *ortogénesis* compartía con el neolamarckismo la *teoría de la recapitulación*. La primera excluía la influencia del medio ambiente, mientras la segunda lo incorporaba a través del *uso-herencia* explicativo de los caracteres adquiridos. La *ortogénesis* significaba, según su principal difusor Theodor Eimer, una teoría basada en la evolución lineal *no adaptativa*. En otras palabras, la variación de las especies era debida a la existencia de una predisposición interna del organismo en sentido unidireccional, al postular que la naturaleza del organismo debía predisponerle a variar exclusivamente en una dirección determinada sin la intervención del medio ambiente. Para los ortogenistas cada una de las especies se regía por un patrón regular de desarrollo en el que la desaparición de una especie venía provocada por la senilidad de la misma. La argu-

La revolución genética

Ahora que la alteración genética de embriones humanos es una realidad y que la industria basada en la manipulación de genes es tan floreciente, no es de extrañar que la gente empiece a preguntarse en qué consiste exactamente la fuerza que se ha desencadenado. Porque en esta ocasión los científicos están jugando con la base de la vida: los genes... Lo más importante es que la ingeniería genética nos permite, también por primera vez en la historia, traspasar las barreras naturales de las especies y combinar los genes de un ser humano con una bacteria, una levadura u otra célula animal...

En la medicina humana existe la posibilidad de emplear la ingeniería genética para eliminar ciertas enfermedades, como la anemia drepanocítica y la talasanemia, o para el estudio del desarrollo del cáncer en sus primeras etapas, o tal vez para desvelar el misterio de esta enfermedad. ¿Adónde nos conducirá todo esto? (Stephanie Yanchinski, La revolución biotecnológica. Explorando los secretos de la vida.)



La doble hélice del ácido desoxirribonucleico (DNA), un hallazgo fundamental para la biología molecular

mentación de la *ortogénesis* respondía a un movimiento de más amplio alcance que engarzaba con la percepción de determinados círculos ilustrados europeos sobre la decadencia de la civilización occidental, que tras la hecatombe de la Primera Guerra Mundial se abrió paso en amplios círculos de la opinión ilustrada. El éxito de *La decadencia de Occidente* de Spengler es una clara manifestación de esta percepción.

Genética y teoría de la evolución

El redescubrimiento en 1900 de las leyes de la mutación genética, establecidas por Mendel en 1865, cambió radicalmente la perspectiva sobre el problema de la evolución de las especies. Las cuestiones en torno a la variación y la herencia dejaron de ser contempladas desde la visión morfológica que había dominado a la teoría darwinista y al neolamarckismo. Por otra parte, se encontró una explicación consistente dentro de la genética mendeliana a la presencia de caracteres *no adaptativos*. Hugo de Vries fue el reintroductor de la genética mendeliana al postular su *teoría de la mutación*, que no hacía referencia a la selección al afirmar que eran los factores internos y no los externos los fundamentales en la evolución. Si bien es cierto que en los primeros pasos de la genética mendeliana, como en el caso de De Vries, no enlazaron con las teorías darwinistas, fue el desarrollo de la genética lo que posibilitó la recuperación del darwinismo, eso sí con algunas importantes correcciones, a la hora de explicar el origen y evolución de los organismos vivos. Neolamarckismo y *ortogénesis* terminaron por desaparecer de la escena ante su imposibilidad de incorporar satisfactoriamente los resultados de la genética mendeliana. Apareció así la *nueva síntesis moderna.*

La actual teoría de la evolución cristalizó a partir de las obras de Theodosius Dobzhansky, *Genetics and the Origin of Species* (1937 y 1941); de Ernst Mayr, *Sistematics and the Origin of Species* (1942) y de George G. Simpson, *Tempo and Mode in Evolution* (1944), que en el campo de la genética, la zoología y la paleontología sentaron las bases de la *nueva síntesis moderna. La*

genética de poblaciones se ha constituido en una de las disciplinas centrales de la moderna teoría evolutiva al suministrar modelos y parámetros relevantes del cambio evolutivo, mediante la distribución de las frecuencias de los genes en las poblaciones. Los desarrollos más recientes de Clegg y Epperson (1985) y Lewontin (1985) han puesto de manifiesto la inmensa variabilidad genética de las poblaciones naturales, al menos para genes estructurales que codifican enzimas, incorporando modelos *estocástico-poblacionales* (modelos de conducta de las poblaciones que se rigen probabilísticamente con dirección al azar). El potencial evolutivo de una población está determinado por la variabilidad genética presente en la población. La evolución se presenta cuando, por mutación, aparece un alelo más eficaz que el *alelo salvaje* correspondiente.

El desarrollo de la biología molecular ha contribuido decisivamente a la nueva teoría de la evolución. El gen ha dejado de ser un punto en el cromosoma para transformarse en una secuencia de información bioquímica. El establecimiento del modelo estructural del DNA por Watson y Crick en 1953 permitió fijar el contenido informacional de los genes sobre la base de las secuencias de aminoácidos. El conocimiento de la estructura del DNA ha permitido avanzar la importancia de los procesos de replicación en la variabilidad molecular que dan lugar a mutaciones, así como la importancia de las regiones no codificadoras en el control de la expresión génica.

El proyecto del genoma humano actualmente en marcha ha sido posible gracias al desarrollo de la biología molecular. El alcance del proyecto del genoma constituye uno de los grandes debates científicos del final del milenio. El conocimiento exacto de la estructura de cada uno de los genes y sus funciones y anomalías está permitiendo ya avanzar en el combate contra algunas de las enfermedades irreversibles del hombre, incluso antes de que se manifiesten. Son los casos del aislamiento del gen que interviene en el cáncer de colon, el problema de la hemofilia... La genética permite detectar la existencia de genes desencadenantes de enfermedades y establecer técnicas analíticas para la prevención precoz de enfermedades, como el cáncer, que de otra forma serían irreversibles. La ingeniería genética está a las puertas de lograr la corrección o eliminación de los genes defectuosos que están en la base de una variada gama de enfermedades. Sin embargo, la controversia surge ante el peligro de que el conocimiento preciso del genoma humano y el desarrollo de la ingeniería genética, posibiliten modificaciones dirigidas a alterar algunos de los rasgos de la herencia genética del hombre. En la actualidad la creación de nuevas especies vegetales o animales con el fin de incrementar la producción agraria es objeto de serios debates. Los criterios productivistas vinculados a los laboratorios de la grandes empresas del sector han provocado en numerosas ocasiones efectos perversos, por la sustitución de especies autóctonas que han terminado en la degradación

Severo Ochoa



Nació en Luarca, Asturias, en 1905. Se doctoró en la Facultad de Medicina de la Universidad de Madrid en 1929. Discípulo de Juan Negrín y colaborador de Jiménez Díaz, amplió estudios en Berlín y Heidelberg y prosiguió su formación en química orgánica en Inglaterra. En 1933 fue nombrado profesor auxiliar de fisiología en la Facultad de Medicina de Madrid; dos años después asumió la dirección de la sección de Fisiología del Instituto de Investigaciones Médicas de la Junta para Ampliación de Estudios. Entre 1937 y 1940 trabajó en Gran Bretaña en problemas de bioquímica cerebral. En 1942 ingresó como investigador en la Facultad de Medicina de Nueva York, siendo nombrado en 1946 director del departamento de Farmacología de dicha Facultad, en 1952 pasó a dirigir el Departamento de Bioquímica. Junto con Arthur Kurnberg se dedicó a la investigación del proceso de formación y destrucción celular y su relación con los caracteres hereditarios, descubriendo la síntesis biológica de los ácidos nucleicos. Investigación por la que recibió el premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1959.

del *lecho ecológico* con el consiguiente empobrecimiento del ecosistema.

El desarrollo de la teoría cuántica, vinculada a los problemas relacionados con la estructura del átomo, se realizó sobre la base de la existencia de dos componentes: el protón y el electrón. El modelo atómico de Rutherford, reformulado en 1913 por Bohr se basaba en este supuesto. De hecho el desarrollo de la mecánica cuántica se realizó sobre la base del comportamiento del electrón. Aunque, ya en 1920, Rutherford postuló la existencia del neutrón, no fue hasta 1932 cuando éste fue descubierto por James Chadwick en el Cavendish. Un año antes, en 1931, Paul Dirac había postulado la existencia de una nueva partícula elemental: el positrón, con la misma masa que el electrón pero con carga eléctrica positiva, cuya existencia fue descubierta en la cámara de niebla por Carl Anderson algunos meses después. La estructura del átomo comenzaba a complejizarse. De hecho, en 1929, Wolfgang Pauli predijo la existencia de una nueva partícula elemental: el neutrino, con el fin de explicar el equilibrio energético de la desintegración beta (β) del núcleo atómico. En 1935, Hideki Yukawa postuló la existencia de los mesones, que en 1947 se comprobó que eran de dos tipos: el pión y el muón.

El ciclotrón posibilitó la creación de isótopos radiactivos, de importantes aplicaciones, entre otras, en el campo de la medicina para el diagnóstico y el tratamiento del cáncer

La física de altas energías

La *física de las partículas elementales* comenzaba su andadura de la mano de la mecánica cuántica. Teoría fundamental de la estructura de la materia. Para ello fue preciso el desarrollo de la *física de altas energías*, debido a la necesidad de romper las fuerzas de ligadura del núcleo atómico. En su primera etapa, el análisis de la estructura atómica se había realizado sobre la base de la radiación alfa (α). Para avanzar en el conocimiento de la estructura del núcleo atómico era necesario conseguir partículas α más energéticas; en 1932, John Cockcroft y Ernest Walton lograron, mediante un multiplicador voltaico, la desintegración artificial de átomos de litio en dos partículas α. Dando un paso más en esta dirección, Van de Fraaff diseñó un generador electrostático para acelerar partículas que alcanzaba los 80 kV, y ya en 1935 llegaba a los cinco millones de voltios (5 MV).

El salto más significativo se produjo de la mano de Ernest Orlando Lawrence que, sobre la base de los trabajos de Rolf Wideröe, desarrolló el ciclotrón. Se fundamentaba en una estructura circular en la que las partículas cargadas entraban en un campo eléctrico alterno, logrando su aceleración por la diferencia de potencial. Lawrence aplicó al modelo de Wideröe la acción de campos magnéticos, que lograban un incremento sustancial de la aceleración de las partículas. En 1932, Lawrence lograba poner en funcionamiento el primer ciclotrón con la colaboración de M. Stanley Livingston en Berkeley. Paralelamente, en la Universidad de Columbia (Nueva York), Harold Urey y su equipo descubrían un isótopo del hidrógeno: el deutèrio, cuyo poder desintegrador era diez veces más potente que los protones. En 1936, con un ciclotrón más potente, se logró medir el momento magnético del neutrón, produciéndose además el primer elemento artificial: el tecnecio. El ciclotrón posibilitó la creación de isótopos radiactivos que pronto revelaron importantes aplicaciones, entre otras, en el campo de la medicina para el diagnóstico y tratamiento del cáncer.

En 1938, Otto Hahn junto con su colaborador Fritz Strassmann observó con sorpresa la producción de bario como consecuencia del bombardeo del urario con neutrones. Se encontraban frente a la primera reacción de fisión nuclear conocida. El 6 de enero de 1939 publicaban sorprendidos estos resultados. Lisa Meitner, antigua colaboradora de Hahn y exiliada en Estocolmo por su origen judío, fue la primera en interpretar correctamente el alcance del descubrimiento de Hahn junto con su sobrino Otto R. Frisch. La aplicación de la fórmula einsteiniana $E = mc^2$ a la fisión del uranio

revelaba dicho proceso como una fuente inagotable de energía. Las bases de la bomba atómica estaban puestas. La proximidad de la Segunda Guerra Mundial aceleró el proceso.

Frisch comunicó los cálculos a Niels Bohr en Copenhague antes de que partiera a Estados Unidos. El 16 de enero de 1939, Bohr y su colaborador Leon Rosenfeld se encontraron en Nueva York con John Wheeler y Enrico Fermi, a los que comunicaron el hallazgo de Hahn y los resultados de Meitner y Frisch. Inmediatamente los físicos en Norteamérica comenzaron a explorar el nuevo horizonte de la posibilidad de provocar reacciones en cadena. Para ello era necesario que, en la fisión del uranio, se produjera más de un neutrón. Joliot en París calculó un valor medio de 3,5 neutrones, mientras en Columbia Fermi contabilizaba dos neutrones. La reacción en cadena era, pues, una realidad. Algo que había predicho en 1934 Leo Szilard a raíz del descubrimiento de la radiactividad artificial por Irène Curie y Frédéric Joliot.

Szilard, consciente del peligro que entrañaba la bomba atómica en manos de la Alemania nazi, se dirigió a Albert Einstein para que alertara al presidente de los Estados Unidos, Franklin Delano Roosevelt. Es la famosa carta de Einstein del 2 de agosto de 1939: *Trabajos recientes de E. Fermi y L. Szilard..., me hacen esperar que el elemento uranio pueda convertirse en una nueva e importante fuente de energía en el futuro inmediato... En el curso de los cuatro últimos meses se ha hecho probable —...— que pueda ser posible establecer una reacción nuclear en cadena en una gran masa de uranio... Este nuevo fenómeno conduciría también a la construcción de bombas y es concebible (...) que de esta manera se puedan construir bombas de un nuevo tipo extremadamente poderosas... En vista de esta situación, acaso pueda usted considerar aconsejable que exista algún contacto permanente entre la administración y el grupo de físicos que trabajan en reacciones en cadena en Estados Unidos.*

En octubre de 1939 se creaba un comité presidencial encabezado por Lyman J. Briggs, era el primer paso del llamado *proyecto Manhattan* que desembocaría en la fabricación de las primeras bombas atómi-

Einstein y la bomba atómica

Creer que armando al país se puede conseguir seguridad es una ilusión funesta, dado el desarrollo de la actual técnica militar. En los Estados Unidos esta ilusión se ha apoyado en otra: o sea, en que han sido los primeros en fabricar la bomba atómica...

La Bomba H se divisa en el horizonte como un objetivo verosímil. Su acelerado proceso de fabricación ha sido solemnemente proclamado por el presidente. Si llega a construirse, la contaminación radiactiva de la atmósfera, y con ella la destrucción de la vida en la tierra, entrarán en el terreno de lo técnicamente plausible.

El horror de este proceso reside en su aparente ineluctabilidad. Cada paso parece consecuencia inevitable del anterior. El aniquilamiento total aparece cada vez con más claridad al final del proceso... No puede llegar a forjarse una paz verdadera orientando todo nuestro comportamiento hacia la eventualidad de un conflicto. Cuanto más, si cada día resulta más evidente que este conflicto significaría la destrucción absoluta... (Albert Einstein, Mi visión del mundo. 1949.)



Oppenheimer conversa con Einstein a principios de los años 40



La primera prueba de la bomba atómica, en el desierto cerca de Los Alamos, Nuevo México (16-7-1945)

cas. A principios de 1941, en plena guerra mundial, Ernest Lawrence se involucraba directamente en el proyecto. Desde que tuvo conocimiento de los trabajos de Hahn, Meitner y Frisch había embarcado a su equipo de Berkeley a investigar el proceso de fisión del uranio en los ciclotrones. En la primavera de 1940, Edwin McMillan y Phillip Abelson descubrieron un nuevo elemento producido por la fisión del uranio en el ciclotrón: el neptunio. En febrero de 1941, Glenn T. Seaborg identificaba un nuevo elemento de la desintegración del neptunio: el plutonio; Halban y Kowarski en Cambridge postularon que este nuevo elemento podía ser fisionable con neutrones lentos. De esta forma, se optimizaba la utilización del uranio, puesto que sólo el escasísimo isótopo del uranio U-235 era capaz de generar reacciones en cadena, mientras que el más frecuente U-238 no lo era, a cambio éste podría producir plutonio. Nacía así la posibilidad de la bomba de plutonio, que fue la utilizada en Nagasaki.

El siguiente paso lo dieron Otto Frisch y Rudolf Peierls en Gran Bretaña, al calcular aproximadamente la masa crítica de uranio necesaria para desencadenar una reacción en cadena autosostenida. Los cálculos les llevaron a considerar esa masa crítica en torno al medio kilo, cuya reacción en cadena liberaría una energía equivalente a miles de toneladas de TNT. La bomba atómica era ya una posibilidad real. En noviembre de 1942 se inauguraba en Nuevo México el laboratorio de Los Alamos, bajo la dirección de Robert Oppenheimer, donde se realizaron las pruebas de la primera bomba atómica. Al amanecer del 16 de julio de 1945 estallaba en el desierto de Nuevo México la primera bomba atómica. El 6 de agosto una bomba atómica de uranio, con una potencia de 20.000 toneladas de TNT y unos 4.500 kilos de peso, arrasaba Hiroshima. El 9 de agosto de 1945 una bomba de plutonio arrasaba Nagasaki. Nacía así la *era nuclear*.

Del átomo al microchip

Una de las derivaciones del *proyecto Manhattan* fue el impulso que recibió la electrónica, sentando las bases prácticas para el desarrollo de los computadores. La participación de John von Neumann en el *proyecto Manhattan* fue, a este respecto, decisiva. Las necesidades de cálculo requeridas para el desarrollo del programa nuclear exigían nuevas innovaciones. Von Neumann conoció por Hermann Goldstine el proyecto de la Morre School of Electronics Engineering de la Universidad de Pennsylvania, embarcada en la construcción del computador electrónico ENIAC

(Electronic Numerical Integrator And Computer) para los Ballistic Research Laboratories, que contaba con 18.000 válvulas. Von Neumann se incorporó al proyecto en el ámbito de la organización lógica. Al finalizar la guerra, Von Neumann se dedicó al desarrollo de máquinas más potentes, que culminaron con la construcción, en Princeton, de la JOHNNIAC, que entró en funcionamiento en 1952. Era el comienzo de la *era de los computadores*. El desarrollo de la *física del estado sólido* en el campo de los semiconductores contribuyó decisivamente a ello. En 1947, el descubrimiento del transistor en los Laboratorios Bell, por Brattain, Bardeen y Shckey, permitió sustituir las viejas y aparatosas válvulas de vacío por los transistores, que redujeron las dimensiones e incrementaron las velocidades de cálculo de los computadores electrónicos.

Sin embargo, los antecedentes de los computadores se remontan más atrás en el tiempo. En 1930, Vannevar Bush desarrolló el analizador diferencial, base sobre la que se fundamentaron los *computadores analógicos*. El siguiente paso se debe a Howard Aiken, creador del Automatic Sequence Controlled Calculator, más conocido como Harvard Mark I, iniciado en 1939 y que entró en funcionamiento en 1944, que podía controlar toda la secuencia de cálculos, lectura de datos e instrucciones en un punto a impresionar sus resultados. Von Neumann y Goldstine avanzaron en el diseño lógico de los computadores, resolviendo los problemas asociados al almacenamiento de datos y programas en una memoria en común, proponiendo el sistema numérico binario, que se aplicó por primera vez en 1949 en el EDSAC de la Universidad de Cambridge y es de la base sobre la que se asientan los computadores desde entonces. Las ideas de von Neumann encontraron su plasmación más acabada en Princeton, el primer prototipo fue el IAS, o máquinas de Von Neumann, a partir de la que se construyeron la AVIDAC, la ORDVAC, la ORACLE, la SILLIAC, la ILLIAC, la MANIAC o la JOHNNIAC antes mencionada.

Sobre el modelo estándar de las IAS, la IBM introdujo el sistema de tarjetas perforadas que permitió desarrollar la IBM-701 en 1953. Un año más tarde aparecía la IBM-650 y en 1959 la IBM-1401. En esta época, Jack Kilby de TI y Robert Noyce de Fairchild Semiconductor crearon el primer circuito integrado, conjunto de transistores y resistencias inteconectados, nacía así el chip, que permitiría dar un salto de gigante en la construcción de computadoras y, en general, en la microelectrónica. Si a principios de los años sesenta un chip incorporaba unos cuantos transistores microminiaturizados, a finales del decenio de los ochen-

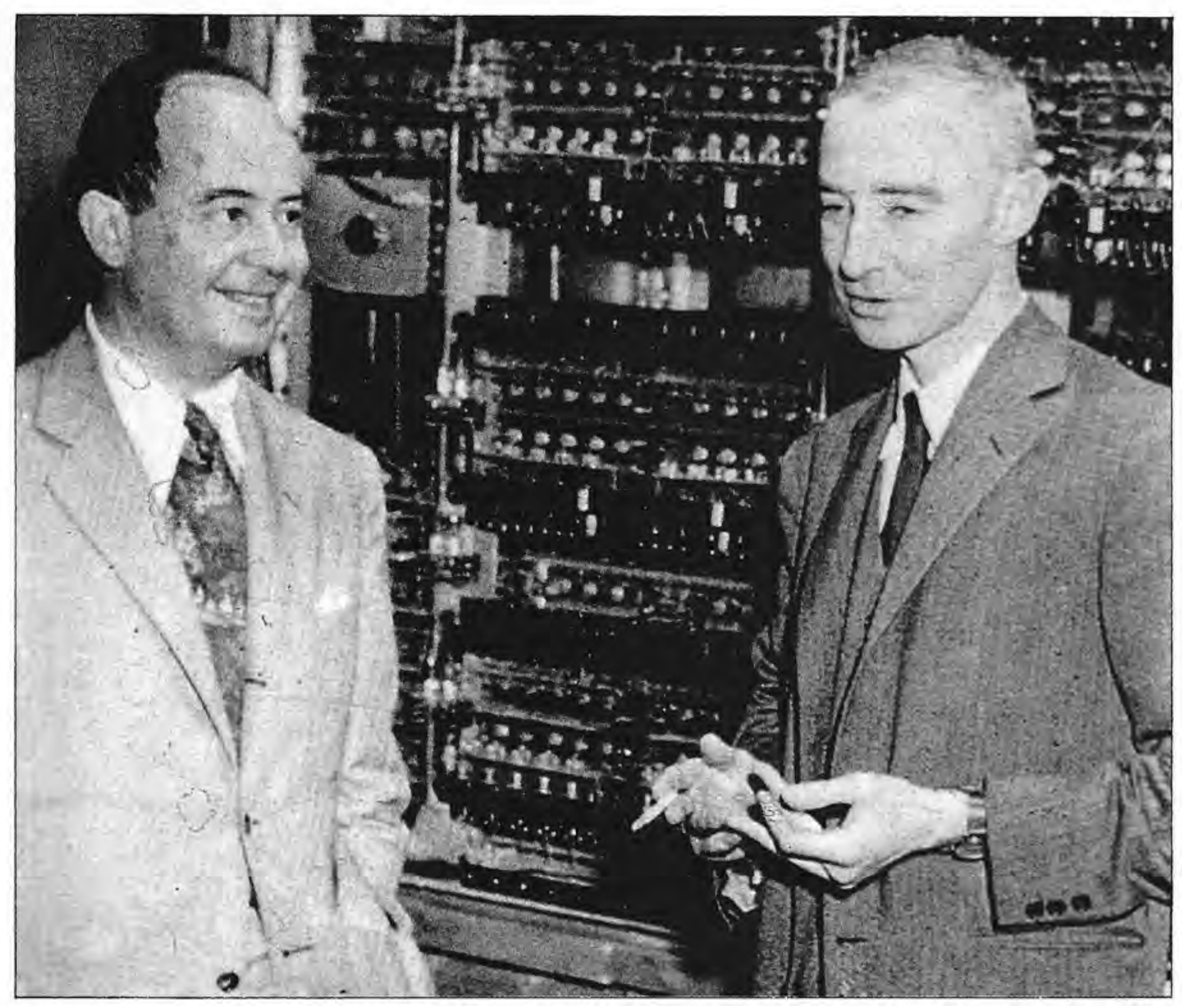
La inteligencia artificial

Un área de gran interés en los últimos años es la que se conoce como inteligencia artificial *(IA)... Los objetivos de la IA son imitar por medio de máquinas, normalmente electrónicas, tantas actividades mentales como sea posible, y quizás llegar a mejorar las capacidades humanas en estos aspectos. El interés por los resultados de la IA procede al menos de cuatro direcciones. En concreto tenemos el estudio de la* robótica*... el desarrollo de* sistemas expertos*, con los que se intenta codificar el conocimiento esencial de toda una profesión... en ¡un paquete de ordenador!...*

Otra área en la que la IA podría tener relevancia directa es la psicología*: se confía en que tratando de imitar el comportamiento de un cerebro humano (o de algún otro animal) mediante un dispositivo electrónico... podamos aprender algo importante sobre el funcionamiento cerebral. Finalmente, existe la esperanza optimista de que... la IA tuviera algo que decir... sobre el significado del concepto de* mente*. (Roger Penrose,* La nueva mente del emperador.*)*

Uno de los primeros computadores experimentales de válvulas





J. von Neumann con R. Oppenheimer. El* proyecto Manhattan *impulsaría el desarrollo de la informática

ta un microchip incorpora millones de transistores. En abril de 1964 IBM desarrollaba el System/360, primera familia de computadores compatibles y, en 1981, creaba la primera computadora personal. En abril de 1976 Steve Wozniak y Steve Jobs fundaban la Apple Computer, que fabricaría la gama de computadores personales competidora con el sistema IBM, los Macintosh. En 1987, IBM lanzó al mercado el IBM PS/2, que ha reemplazado su anterior línea de computadoras personales.

El avance en el campo de los ordenadores ha exigido combinar diferentes disciplinas desde la lógica formal a la física cuántica, pasando por la física del estado sólido, la cibernética, la teoría de la información, la ciencia de sistemas y la teoría de sistemas. Dos ramas han sido precisas para ello: el *hardware,* o soporte material de los computadores, esto es la estructura de las máquinas, donde la física del estado sólido ha sido transcendental, al permitir desarrollar los transistores y, posteriormente, los microchips, mediante los avances registrados en el campo de la semiconductividad y más recientemente de la superconductividad, en los que la física cuántica es fundamental, logrando máquinas infinitamente más potentes y reducidas; y el *software,* o lenguajes de programación, donde las matemáticas, la lógica formal, la teoría de la información y la teoría de sistemas han desempeñado un papel esencial, dando lugar a nuevas aplicaciones fruto del avance de la programación computacional, un campo donde el concepto de algoritmo es imprescindible.

Los trabajos del británico Alan M. Turing en 1936, Emil Post en 1943 y Markov en 1947 han sido básicos en el desarrollo de la teoría algorítmica, cuyos antecedentes inmediatos se sitúan en el cálculo lambda de Alonzo Church y las funciones recursivas generales de Gödel. La máquina universal de Turing es un sistema matemático diseñado para manejar el problema general del

cálculo no un objeto, de manera que para un argumento dado el valor de la función puede encontrarse utilizando sólo reglas preasignadas, aplicadas por la computadora y construidas previamente en su estructura. Su importancia reside en el hecho de que una máquina universal de Turing puede en principio ejecutar todo tipo de cálculo que sea realizable, Church señaló en 1936 que es el mecanismo más general posible para la solución de un problema resoluble. Shannon ha reducido el número de estados internos de la máquina de Turing a sólo dos, simplificando considerablemente el diseño de una máquina de Turing.

Von Neumann ha extendido el principio de la máquina universal de Turing a los procesos biológicos regidos por los mecanismos de replicación del DNA. Lo que ha llevado a los defensores de la *Inteligencia artificial fuerte* a pensar en la posibilidad de construir máquinas inteligentes, abriendo un nuevo campo en el que se entrelazan la física y química cuánticas con la bioquímica del cerebro y la cibernética. En la actualidad los computadores, tanto en serie como en paralelo, se basan en los principios de la máquina universal de Turing. Sin embargo, el propio Turing ha reconocido posteriormente que no puede existir un algoritmo general capaz de decidir sobre todas las cuestiones matemáticas. A ello ha contribuido decisivamente el teorema de incompletud de Gödel, al demostrar que el programa de David Hilbert era irrealizable, en tanto en cuanto cualquiera de los sistemas de matemáticas formales de axiomas y reglas de inferencia debe contener algunos enunciados que no son demostrables ni indemostrables con los medios permitidos dentro del sistema.

Del microcosmos al macrocosmos

Habíamos dejado el problema de la estructura de la materia con el descubrimiento de los mesones, formados por piones y muones en 1947. Para avanzar en el complejo mundo cuántico se hacían necesarios aceleradores más potentes que los ciclotrones de Lawrence. En 1945, MacMillan en Estados Unidos y Veksler en la Unión Soviética propusieron el principio de estabilidad de fase para construir aceleradores más potentes, surgieron así el sincrociclotón y el sincrotón; además, merced a los trabajos de Alvarez, Hansen y Panfosky, se construyeron aceleradores lineales capaces de alcanzar los 900 MeV, como el de Stanford. En 1943 Oliphant proponía un nuevo tipo de acelerador en forma de anillo, en el que la aceleración se lograría por la variación simultánea del campo magnético y la frecuencia de la tensión aplicada, principio que fue desarrollado en 1952 por Courant, Livingston, Snyder y Cristofilos, que desembocó en la construcción en Ginebra del sincrotón del CERN en 1959, que alcanzaba los 28,5 GeV. Entre tanto, la radiación cósmica vino en ayuda de los físicos. De esta forma, fueron identificados los piones y los muones mediante la interpretación de las trazas dejadas en placas fotográficas por los rayos cósmicos.

Microcosmos y macrocosmos aparecían ligados entre sí. La estructura de la materia y del Universo debían de mantener una fuerte interrelación. De alguna manera la relatividad y la mecánica cuántica deberían estar relacionadas. De hecho, esa ligadura ya se había puesto de manifiesto con el *principio de exclusión de Pauli* y la ecuación de Dirac, desarrollada en 1928, que le llevó a postular la existencia del positrón, dando entrada al concepto de antimateria, esto es, la existencia de pares de partículas iguales con carga distinta. En 1950 en Berkeley se identificaba un nuevo pión, el pión neutro. A partir de entonces han ido apareciendo nuevas partículas, como los mesones K y los hyperiones. El modelo propuesto por Yukawa para explicar el comportamiento de la interacción fuerte, responsable de la estabilidad del núcleo atómico, fue sustituida en los años setenta por la cromodinámica cuántica (QDC) debido a la creciente complejidad del mundo atómico con la aparición de los quarks. Las partículas que interaccionan fuertemente se denominan hadrones, que a su vez están integrados por dos familias de partículas los mesones y los bariones.

Las características y propiedades de los bariones ha dado lugar al establecimiento de la ley de conservación del número bariónico, por la que el número de bariones y antibariones se conserva y explica la estabilidad del protón, que es un miembro de la familia de los bariones, y con ella de la estabilidad de la materia. Además de los hadrones, existen los leptones, constituidos



Stephen Hawking, autor de diversas investigaciones sobre el* big bang, *junto a su ayudante J. Brenckley

por el electrón, el neutrino y los muones. A su vez los hadrones están formados por quarks; éstos fueron propuestos en 1964 por Murray Gell-Mann y George Zweig. Los mesones están constituidos por un par quark-antiquark, mientras los bariones tienen tres quarks. Según la cromodinámica cuántica, los quarks nunca pueden aparecer bajo la forma de partículas libres. En los años setenta ha sido posible determinar las cargas de los quarks en el interior del protón, gracias al SLAC (Stanford Linear Accelerator Center). Junto con los quarks, en el interior de los hadrones se encuentran los gluones, responsables de la unión de los nucleones, observados en 1979 por el acelerador PETRA de Hamburgo. Como consecuencia del descubrimiento en la radiación cósmica de una nueva partícula neutra, llamada hyperión lambda, y del mesón K a ella asociado, se descubrió un nuevo número cuántico, al que se denominó *extrañeza*, que aparece asociado a un nuevo quark, el quark *s*. La desintegración de las partículas

con extrañeza responden, como la desintegración, a la interacción débil. La combinación de los quarks *d, u* y *s* explican la existencia de los hyperiones epsilon, descubiertos a principios de los años cincuenta, los hyperiones forman la familia de las partículas delta.

En 1964 se descubrió una nueva partícula con extrañeza, la omega (ω) predicha con anterioridad por la teoría de Gell-Mann y Ne'eman, con ella podían interpretarse satisfactoriamente los sistemas de hadrones constituidos por los quarks *d, u* y *s*. Sin embargo, en la segunda mitad de los años sesenta los físicos predijeron una nueva interacción, la interacción de la corriente neutra que fue observada en el CERN en 1973, asociada a un nuevo quark: el quark *c*, predicho en 1970 por Sheldon Glashow. En 1974 se descubrió en el laboratorio Brookhaven, por Sam Ting, y en el SLAC, por Burton Richter, una nueva partícula, la psi, que Richard Feynman y Harald Fritzsch atribuyeron a un nuevo número cuántico al que denominaron *encanto*. En 1979 se encontraron evidencias de la existencia del número cuántico *encanto* en los bariones, que se añadían así a los *mesones encantados*. En 1970 Gell-Mann y Fritzsch postularon la existencia de un nuevo número cuántico al que llamaron *color*, para explicar por qué el estado de la partícula delta es antisimétrico como exige el principio de exclusión de Pauli. De esta forma, los quarks podían ser rojos, verdes y azules —los colores son exclusivamente denominaciones—, con el número cuántico *color* se desarrolló la cromodinámica cuántica (CDQ), que ha venido ha completar a la electrodinámica cuántica (QED) que se ocupa de la interacción electromagnética a escala cuántica, para explicar la estructura y comportamiento de la materia.

El modelo actual de universo dinámico se ajusta a la existencia de una flecha en el tiempo, que discurriría desde el big bang _hacia el futuro_

La física de las partículas elementales ha permitido avanzar en el conocimiento de la estructura del Universo. De esta forma, relatividad general y física cuántica se revelan como dos teorías fundamentales para comprender el macrocosmos. La razón de ello estriba en el hecho de que las partículas elementales requieren altísimas energías para su producción, capaces de romper las fuerzas de ligadura del núcleo atómico. Estos procesos sólo se producen en el interior de las estrellas o en la explosión de las mismas en sus variadas formas, en función de su masa: supernovas y gigantes rojas, que dan lugar a estrellas de neutrones, agujeros negros, enanas blancas y enanas negras; o en las primeras etapas del *big bang*. El *big bang* se considera la singularidad inicial de la que parte nuestro actual Universo. La teoría del *big bang* forma parte del modelo estándar surgido de la relatividad general, que además se ajusta con bastante precisión a los resultados de la física cuántica en el mundo de las partículas elementales. En 1948, George Gamow predijo que debería existir un rastro en el Universo de la explosión inicial o *big bang*, dicho rastro fue observado en 1965 por Penzias y Wilson, era la *radiación de fondo de cuerpo negro*, radiación térmica de 2,7 grados Kelvin residuo del *big bang*.

En los instantes posteriores al *big bang* el Universo estaba extremadamente caliente y condensado, en aquellos momentos las leyes de la física no operaban y las partículas elementales de la materia no eran viables. Steven Weinberg ha descrito lo que sucedió en el lapso de tiempo comprendido entre una diezmilésima de segundo después del *big bang* y los tres primeros minutos del Universo actual, lapso en el que el Universo inició su expansión y enfriamiento, haciendo posible las fuerzas de ligadura que regulan las leyes de la física. Una hora y cuarto después del *big bang* la temperatura ha descendido a algo menos de una décima parte, unos 300 millones de grados Kelvin; en ese momento las partículas elementales se encuentran ligadas en núcleos de helio o en protones libres, además de la existencia de electrones. Alrededor de 700.000 años después del *big bang* la expansión y el enfriamiento del Universo permitió la formación de núcleos y átomos estables, el desacoplamiento de la materia y la radiación posibilitaría el inicio del proceso de formación de galaxias y estrellas.

El modelo actual del Universo incluye la *flecha del tiempo*, que en el ámbito de la física había sido introducida por Ludwig

Boltzmann con la segunda ley de la termodinámica en el último tercio del siglo XIX. La segunda ley de la termodinámica afirma que la entropía de un sistema aislado aumenta con el tiempo. En términos generales, la entropía de un sistema es una medida de su desorden manifiesto. La segunda ley de la termodinámica introduce la asimetría temporal, o *flecha del tiempo*. El Universo es por definición un sistema aislado, además el modelo actual del Universo dinámico y en expansión se ajusta a la existencia de una *flecha del tiempo,* cuya dirección discurriría desde el *big bang* hacia el futuro. El problema se plantea a la hora de hacer compatible la entropía del Universo, regida por la segunda ley de la termodinámica, y las ecuaciones de la relatividad general y de la mecánica cuántica que son simétricas en el tiempo, especialmente las primeras, en tanto en cuanto la reducción del paquete de ondas dentro del formalismo mecanocuántico es asimétrica temporalmente. En la actualidad se piensa que la solución a este problema vendrá de la mano de la construcción de una *teoría de la gravitación cuántica,* una teoría cuántica de la estructura del espacio-tiempo, para lo que el estudio de los *agujeros negros* se revela como el camino más factible, los trabajos de Roger Penrose y Stephen Hawking van en esta dirección. La revolución científica del siglo XX ha dado lugar a una nueva representación del Universo y de la Naturaleza. Del Universo infinito y estático característico de la época moderna, surgido de la revolución newtoniana, se ha pasado al universo dinámico y en expansión de las revoluciones relativista y cuántica. De la Naturaleza regida por leyes deterministas, derivadas del carácter universal de la *Ley natural de la causalidad,* se ha pasado a una concepción de la Naturaleza articulada sobre la base de los procesos complejos, en los que el carácter probabilístico de los fenómenos cuánticos afecta no sólo al ámbito de la física del microcosmos y del macrocosmos sino también a los propios procesos biológicos, como consecuencia de la trascendencia de los procesos bioquímicos en los organismos vivos.

La representación determinista característica de la racionalidad de la civilización occidental en la época moderna, que se articulaba en tres grandes postulados, espacio y tiempo absolutos y principio de causalidad estricto, tiene que ser reemplazada por una nueva racionalidad. Una nueva racionalidad que, desde el paradigma de la complejidad, sea capaz de integrar de forma coherente y consistente *azar* y *necesidad.*

BIBLIOGRAFIA

Einstein, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general,* Madrid, Alianza, 1984.

Friedman, M., *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo,* Madrid, Alianza, 1991.

Fritzsch, H., *Los quarks, la materia prima del Universo,* Madrid, Alianza, 1984.

Geroch, R., *La relatividad general (de la A a la B),* Madrid, Alianza, 1985.

Hawking, S. W., *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros,* Barcelona, Crítica, 1988.

Holton, G., *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein,* Madrid, Alianza, 1982.

Kuhn, Th. S., *La estructura de las revoluciones científicas,* Madrid, FCE, 1982.

Kuhn, Th. S., *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912,* Madrid, Alianza, 1980.

Lakatos, I., *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales,* Madrid, 1982.

Mandelbrot, B., *Los objetos fractales,* Barcelona, Tusquets, 1987.

Monod, J., *El azar y la necesidad,* Barcelona, Tusquets.

Moya, A., *Sobre la estructura de la teoría de la evolución,* Barcelona, Anthropos, 1989.

Olby, R., *El camino hacia la doble hélice,* Madrid, Alianza, 1991.

Penrose, R., *La nueva mente del emperador,* Madrid, Mondadori, 1991.

Prigogine, I., *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden,* Barcelona, Tusquets, 1983.

Prigogine, I. y Stengers, I., *La nueva alianza,* Madrid, Alianza, 1990.

Prigogine, I. y Stengers, I., *Entre el tiempo y la eternidad,* Madrid, Alianza, 1990.

Ruse, M., *La revolución darwinista,* Madrid, Alianza, 1983.

Selleri, F., *El debate de la teoría cuántica,* Madrid, Alianza, 1986.

Sánchez Ron, J. M., *El origen y desarrollo de la relatividad,* Madrid, Alianza, 1985.

Sánchez Ron, J. M., *El poder de la Ciencia,* Madrid, Alianza, 1992.

Wagensberg, J., *Ideas sobre la complejidad del mundo,* Barcelona, Tusquets, 1985.

Weingberg, S., *Los tres primeros minutos del Universo,* Madrid, Alianza, 1986.

Yanchinski, S., *La revolución biotecnológica. Explorando los secretos de la vida,* Madrid, Debate, 1985.

CUIDA

el

Ozono

